



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

OPTIMALIZACE NÁVRHU
PROVĚTRÁVANÝCH FASÁDNÍCH SYSTÉMŮ

OPTIMIZING THE DESIGN OF VENTILATED FACADE SYSTEM

TEZE

THESIS

AUTOR PRÁCE

Ing. Miloslav Novotný

AUTHOR

ŠKOLITEL

doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024

ABSTRAKT

Vzduchová izolace se v dnešní době dostává do popředí zájmu investorů, zvláště potom v návrhu fasádních systémů. Při současných znalostech tepelné techniky a akustiky je prokazatelné pomocí normových výpočtů účinnost provětrávané fasády pro zlepšení celkových vlastností budovy. Častěji než zlepšení tepelně technických a akustických vlastností je však motivace návrhu takového systému spíše designového rázu.

Každý objekt je unikátní. Proto je třeba počítat s velkým počtem proměnných faktorů, které obrazně vstupují do hry při návrhu a posouzení vlastností konstrukcí.

Provětrávané zateplovací systémy patří k jedné z mnoha možností vnějšího zateplení budov. Jsou používány u staveb občanské vybavenosti, průmyslových objektů a k zateplení rodinných domů. Jedná se o dvouplášťové stavební konstrukce, tvořené z nosné stěny a předsazené pohledové konstrukce. Opláštění předsazené konstrukce může být zhotoveno jako celistvá povrchová úprava – tj. upravena omítkou (tato úprava není k rozeznání od kontaktního zateplovacího systému), nebo dělená – povrchová vrstva je tvořena deskami z různých materiálů. V prostoru mezi nimi vzniká větraná vzduchová mezera. Touto mezerou stoupá po celé výšce fasády proud vzduchu. Díky tomuto mechanismu pomáhá proudící vzduch ve větrané mezeře v letním období snižovat tepelné zisky interiéru. V zimním období účinně snižuje míru kondenzace vodní páry v oblasti nosné stěny a tepelné izolace. Tím výrazně snižuje tepelné ztráty objektu a předchází vlhnutí konstrukce.

Disertační práce pojednává o možnostech optimalizace řešení provětrávaných fasádních systémů v procesu navrhování a posuzování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vzduchová dutina, provětrávaná fasáda, kompozitní obklad, anemometrická čidla, CFD

ABSTRACT

Today, air-conditioning is at the forefront of investor interest, especially in the design of façade systems. With the current knowledge of thermal engineering and acoustics, the efficiency of the ventilated façade to improve the overall building performance is demonstrated by standard calculations. However, more often than improving the thermal and acoustic properties, the design motivation of such a system is more of a design character.

Every object is unique. Therefore, a large number of variable factors that fit into play when designing and assessing structural properties are to be considered.

Extruded thermal insulation systems are one of the many possibilities of external building insulation. They are used in civic amenities, industrial buildings and thermal insulation of family houses. It is a double-skinned building structure, consisting of a load-bearing wall and a pre-mounted construction. The cladding of the pre-assembled structure can be made as a complete surface treatment - that is, plastered (this is not a distinction from the thermal insulating system) or divided - the surface layer is made of boards of different materials. A ventilated air gap is created between them. With this gap the air flow rises along the entire height of the facade. Thanks to this mechanism, the air flow in the ventilated spaces helps reduce the thermal gains of the interior during the summer. In the winter, it effectively reduces the amount of water vapor condensation in the area of the load-bearing wall and thermal insulation. This greatly reduces the heat loss of the object and prevents the structure from dampening.

The dissertation thesis deals with possibilities of optimization of ventilated façade systems in the design and assessment process.

KEY WORDS

Air cavity, ventilated façade, composite cladding, anemometric sensors, CFD

OBSAH

1. ÚVOD	8
1.1. Výpočetní přístupy	9
2. VYMEZENÍ PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLE PRÁCE	10
2.1. Vymezení problémů	10
2.2. Vymezení cílů	12
3. METODY ZPRACOVÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	13
3.1. Měření „in situ“	14
3.2. Experimentální program 2	14
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ A KOMPARACE EXPERIMENTŮ A SIMULACÍ	23
4.1. Shrnutí výsledků měření „in situ“	23
4.2. Shrnutí výsledků numerické simulace	24
4.3. Komparace výsledků měření „in situ“ a numerické simulace	29
4.4. Shrnutí komparace výsledků měření „in situ“ a numerické simulace	30
5. ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE	31
5.1. Závěry k dosaženým výsledkům	32
6. SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ	34

1. ÚVOD

Následující disertační práce je věnována problematice předsazených fasád domů. Nejdůležitější otázkou je proudění vzduchu, kterou je potřebné spolehlivě ověřit. Toho lze dosáhnout řešením problému třemi metodami; experimentální metodou, která bývá nákladná, používá se anemometru a teplotních čidel, avšak je nejspolehlivější; analytickým řešením soustavy řídicích rovnic pro konkrétní vzdušinu, což je velmi komplikované a účelné jen pro jednoduché případy. Třetí metodou je výpočtové stanovení dynamiky tekutin neboli CFD (Computational Fluid Dynamics) [5]. Také ČSN 73 0540 - 4 [1] obsahuje popis proudění vzduchu ve provětraných opláštěních budov pro určení teploty v provětrávané vzduchové spáře.

Oproti klasickým masivním konstrukcím obvodových plášťů mají předsazené fasády některé výhody, zejména:

- vysoká funkčnost fasády, tepelná izolace zůstává trvale suchá díky ventilaci,
- vysoká energetická účinnost díky izolaci z minerální vlny a inovativním spodním konstrukcím umožňuje dosáhnout téměř jakékoliv požadované hodnoty U [2],
- jednoduché řešení pro nerovné a obtížné povrchy díky nastavitelné nosné konstrukci,
- přispívají k vytvoření příjemného klimatu v místnostech díky klesajícímu difuznímu odporu vodní páře zevnitř směrem ven,
- poskytují účinnou letní ochranu před horkem díky větracímu prostoru odváděním tepelné zátěže přes větrací prostor,
- vytváří zimní tepelnou ochranu zvýšením tepelného odporu prostupu větracím prostorem,

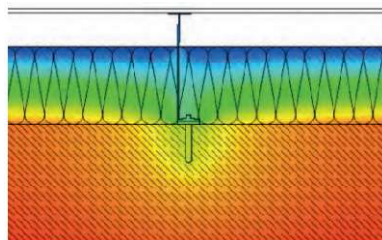
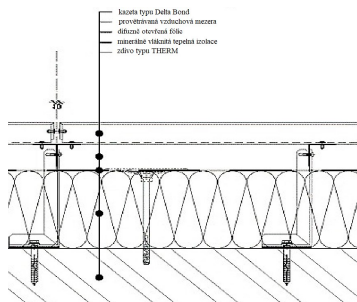
- udržitelná konstrukce pro budovy díky dlouhé životnosti, nízkým nákladům na údržbu a samostatným materiálovým vrstvám (důležité hledisko pro rekonstrukci a recyklaci po skončení životnosti fasády),
- spolehlivá požární ochrana díky vhodnému výběru komponent fasádního systému a zařídění použitých stavebních materiálů,
- neprůzvučnost pro zatížení hlukem, vysoký stupeň neprůzvučnosti se dosahuje díky pohltivosti minerálních izolačních materiálů ve spojení s opláštěním s velkou plošnou hmotou,
- ochrana před bleskem, kovový nosný systém stavby nebo kovové opláštění se napojuje na systémy ochrany před bleskem.

Tato práce se věnuje jednak problematice konstrukčního uspořádání vybraného stávajícího systému předsazené fasády, její fyzikální diagnostice a zejména simulační metodě CFD, která je na rozdíl od předcházejících metod levnější s možnostmi provedení rozsáhlejších výpočtů. CFD je tedy výpočetní metoda umožňující vytvářet výpočetní modely, lze předikovat chování vzdušiny se všemi zákonitostmi včetně případného vytváření vírů.

1.1. Výpočetní přístupy

Postup numerického modelování sestává ze tří částí, první zahrnuje tzv. preprocesor zahrnující přípravu modelu, druhá výpočtu pomocí řešitele (solveru) a třetí využívá zobrazovače výpočtového procesu (postprocessor), tedy prostředky pro vyobrazení výsledků.

Práce se věnuje teoretickému popisu principu CFD numerického modelování, kde jsou uvedeny rovnice proudění, dostupné modely turbulence a metody numerického řešení [6]. Následující část je věnována uspořádání CFD procesu, uspořádání geometrie modelu, počátečním podmínkám fyzikálního modelu a nastavování okrajových podmínek.



Obr. 1 Výpočtové ověření teplotní pole v cihelné stěně v oblasti kotvení nosného systému. (informativní obrázek).

2. VYMEZENÍ PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLE PRÁCE

V současné době existují tři možné metody, které slouží k ověření proudění vzduchu v předsazené fasádě. Vzhledem k velmi komplikovaným výpočtům, které tyto metody zahrnují je vhodné a žádoucí tyto metody optimalizovat a zajistit tak časovou a ekonomickou úsporu.

Provětrávaná fasáda musí být zejména funkční, efektivní a ekonomicky přínosná pro celkovou energetickou náročnost budovy. Tyto požadavky při správném návrhu splňuje. Nespornou výhodou předsazených fasád je, oproti fasádám klasickým, že poskytují účinnou ochranu také v letním období a zamezují přehřívání konstrukcí pod ní.

2.1. Vymezení problémů

Výpočtové programy pro předsazené fasádní systémy představují složité technologie, které se běžně nenacházejí na komerčním trhu. Většinou jsou tyto výpočty řešené druhotně standartními, avšak pro tuto problematiku nedostačujícími softwary. Bohužel

tato problematika není zatím v obecném povědomí příliš známá a je řešena především okrajově.

Současně s vývojem a poznáním výzkumných institucí a vysokých škol se na trhu objevují firmy, které se zaměřují na aplikace předsazených fasád. Tyto společnosti často využívají těchto systémů nejen jako formu sanace nebo jako architektonicky zajímavý a určující prvek objektu. Naopak zlepšují vnitřní mikroklima, zajišťují delší životnost fasády a obecně přispívají k lepším tepelně technickým vlastnostem obálky budovy. Bohužel, v mnoha případech chybí relevantní informace o parametrech a charakteristikách fasády, a není jasné, za jakých podmínek byly tyto charakteristiky určeny, pokud vůbec stanoveny byly. Používání provětrávané dutiny v obálce budovy bez vlastní ověření jejích parametrů pro konkrétní praktickou aplikaci poté nepřináší měřitelné výsledky pro koncové uživatele a ve většině případů může se jednat pouze o architektonický prvek bez stavebně fyzikálních přínosů a v některých případech může naopak zvyšovat energetickou náročnost objektu.

Situace na trhu v současné době velmi nahrává danému řešení fasádních systémů, nicméně bez bližšího definování konkrétních přínosů. Stále však panuje obava z možného vlivu tepelných mostů vznikajících v důsledku kotvení nosného systému fasády pomocí ocelových nebo hliníkových kotevních prvků. Tato obava však není podložena relevantními výsledky a lze říci, že byla relativně účinně vyřešena.

Dalším problémem je vyšší cena oproti kontaktním zateplovacím systémům. Avšak v kontextu přínosu pro uživatele, životnosti a celkového zlepšení vlastností fasády, je tento rozdíl akceptovatelný. Musí však být navržena a provedena správně, a sice tak, aby zajistila snížení energetické náročnosti objektu. Je třeba na tuto problematiku nahlížet v horizontu celé životnosti objektu.

Navzdory těmto výzvám je provětrávaná fasáda většinou více, či méně efektivní, pokud jsou však dodržovány základní konstrukční zásady. Vědecký výzkum zaměřený na praktické ověření chování ve větrané dutině je v této oblasti klíčovým směrem vývoje. Je

však důležité, aby tyto experimenty byly dobře definované, měly správné okrajové podmínky a měřily všechny relevantní charakteristiky pro následnou validaci.

2.2. Vymezení cílů

Na základě poměrně rozsáhlé rešeršní činnosti, jak v ČR tak především v Evropě, ale také ve světě byly stanoveny dva hlavní cíle disertační práce, které směřovaly k analýze působení provětrávání fasády, a sice:

- **Prvním cílem je ověření funkčnosti provětrávaných fasádních systémů** a popis fyzikálních jevů k nimž dochází ve větraných vzduchových mezerách v rámci modelového roku a zajištění relevantních dat pro matematické modelování.
- **Druhým hlavním cílem je vytvoření relevantního matematického modelu** pro výpočet funkčnosti provětrávaných fasádních systémů za účelem optimalizace návrhu fasádních systémů pomocí výpočetních modelů pro dosažení minimální možné energetické náročnosti konstrukce.

Cíle práce byly dosaženy prostřednictvím realizace dvou skupin experimentálních programů, zahrnujících studium stanovení okrajových podmínek fasády a na ně navazující samostatné nastavení numerického modelu.

První skupina experimentální činnosti je zaměřená na stanovení okrajových podmínek konstrukce. Jako nejvýznamnější byly vybrány tloušťka větrané dutiny, rozdíl výšek příváděcích a odváděcích větracích otvorů a samotný materiál provětrávané fasády.

Druhá skupina experimentů byla věnována správnému nastavení numerického výpočtového modelu.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Teoretické

- Rešerše problematiky – v rámci rešeršní činnosti byly studovány výzkumy obdobné problematiky provětrávaných fasád realizované především v rámci Evropy, ale také ve světě, ale i v rámci české republiky.
- Studium teoretických fyzikálních zákonitostí – v počátku výzkumu bylo nutné nastudovat a popsat především fyzikální jevy, které se odehrávají ve větraných vzduchových mezerách v průběhu modelového roku a s těmito následně pracovat v rámci validace a verifikace výpočetních modelů.

Experimentální

- Měření in situ – na základě zjištění a popisu fyzikálních jevů, jež vznikají ve větraných vzduchových mezerách bylo nutné sebrat relevantní data pro validaci matematických modelů.
- Laboratorní – krátkodobé ověření funkčnosti vybraných systému, které tvoří předsazené fasády a verifikace okrajových podmínek.

Numerické metody

- Matematické simulace – předně bylo nutné ověřit funkčnost běžně výpočetních simulací za účelem výpočtu proudění vzduchu ve větraných vzduchových mezerách. Součástí numerických simulací bylo modelování CFD a vývoj softwaru pro návrh provětrávaných fasádních systémů.

Komparativní metody

- Porovnávání experimentálních měření a matematických modelů, zda se liší, jak si odpovídají a jejich následná verifikace za účelem validace simulací.

Závěry

- Vyvození závěrů práce na základě experimentální činnosti a CFD modelace. Výsledky všech experimentů byly integrovány do několika článků, publikovaných v

periodikách v hodnocených databázích (WoS a Scopus). Tímto způsobem bylo zajištěno, že široká veřejnost, včetně odborníků, měla přístup k informacím o probíhajícím výzkumu. Tato práce nejenže prezentuje dosažené výsledky, ale také poskytuje platformu pro další rozšíření a zkoumání této oblasti v budoucnu.

3.1. Měření „in situ“

Jedním z opěrných bodů pro správné vyhodnocení bylo měření „in situ“, které pro účely této práce probíhalo na třech modelových objektech při jejich plném užívání. V jednom případě se jednalo se o administrativní budovu s přidruženou výrobou, kde opláštění fasády je tvořeno kazetami tak, že předsazená fasáda netvoří průběžnou vodorovnou spáru. Ve druhém případě se jednalo také o administrativní budovu přibližně stejné výšky, s tím rozdílem, že průběžné vodorovné i svislé spáry předsazené konstrukce tvoří průběžné spáry. Ve třetím případě šlo o měření na objektu EXDR1, který slouží k experimentálnímu měření na různých konstrukcích, kde je fasádní obklad dřevěný.

3.2. Experimentální program 2

V rámci práce byly provedeny experimenty, týkající se měření „in situ“. Měření bylo prováděno na administrativní budově za plného provozu. Pomocí anemometrických čidel byla zaznamenávána teplota a rychlost vzduchu ve větrané dutině fasády. Tyto výsledky budou dále srovnávány s CFD modelováním obdobně řešené fasády.

V rámci zpracování této disertační práce byla také řešena spolupráce na projektu Technologické agentury České republiky číslo FW03010062 s názvem Chytrá fasáda s optimalizovanými energetickými vlastnostmi v programu FW – TREND, podprogramu 1 – Technologičtí lídři. Jak ukazuje výzkum energetických a tepelných vlastností v zimním období, fasáda s větranou mezerou se chová jiným způsobem, než předpokládá výše uvedená teorie. Spolupráce probíhala formou 20 % úvazku vědeckého pracovníka a byla zaměřena na pomoc při vytváření algoritmů pro výpočet tepelně technických vlastností

fasády s větranou mezerou s výstupem formou korigovaného součinitele prostupu tepla zahrnujícího bodové činitele tepelných mostů při kotevním systému fasády, dále spoluprací při tvorbě algoritmu pro zjištění energetického chování fasády s větranou mezerou a spoluprací při tvorbě matematického CFD modelu v projektu zkoumané fasády.

FSVM software je volně dostupná webová aplikace podporovaná ČKAIT, dostupný na <https://profesis.ckait.cz/r-5-2/>.

Protože projekt v době zpracování této disertační práce probíhá a výstupy z projektu jsou zatím neveřejné, jsou dále prezentovány pouze vybrané ukázky výstupů, které byly odsouhlaseny hlavním řešitelem projektu za VUT.

3.2.1. Spolupráce na vývoji software FSVM

Program pro výpočet tepelně technických parametrů fasády s větranou mezerou realizuje rychlý výpočet návrhového součinitele prostupu tepla s vlivem kotevních prvků procházející skrze izolaci až do vlastní nosné konstrukce fasády. Typ pláště je definován jeho materiálem a plošnou hmotností. Program má formu volně přístupné webové aplikace. Algoritmus výpočtu zohledňuje skladbu konstrukce, materiál stěnových úhelníků a jejich počet vzhledem k plošné hmotnosti zavěšeného pláště a také vliv podložky včetně její tloušťky. Součástí zadání je rychlý návrh plochy fasády s plochou okenních otvorů a definice venkovní a vnitřní návrhové teploty. Výsledkem je návrhový součinitel prostupu tepla popisující výměnu tepla v ustáleném stavu mezi vnitřním a vnějším prostředím, které jsou odděleny venkovní stěnou o tepelném odporu R s přilehlou mezní vzduchovou vrstvou. Tento součinitel prostupu tepla zahrnuje vliv všech tepelných mostů prostupujících kotevních prvků, které jsou součástí konstrukce. Aktuální struktura programu FSVM 1.0 zahrnuje aplikaci algoritmu vedení a přestup tepla z nosného kotvícího úhelníku fasády přes případné plastové podložky a vlastní kotevní systém do nosné obvodové konstrukce. Vypočítaný korigovaný součinitel prostupu tepla lze využít pro popis tepelně technické vlastnosti obvodového pláště

v průkazu Energetické náročnosti budovy a zároveň slouží, jako jeden z parametrů (okrajová podmínka) pro celoroční výpočet energetických vlastností fasády (tepelný tok-zisk/ztráta) s větranou mezerou.

3.2.2. Výpočet energetických vlastností fasády s větranou mezerou pomocí FSVM software

Jedná se o neveřejný modul popisovaného FSVM software. V praktických výpočtech jsou využity teoretické přístupy, které jsou popsány výše v kapitolách souvisejících se sdílení tepla fasádou s větranou mezerou. V těchto kapitolách uvedené vlivy tvoří dílčí okrajové podmínky, které se svou synergií posléze uplatní v energetické bilanci mezi interiérem budovy a vnějším prostředím. Aby bylo možné tyto vlivy zahrnout do výpočtů, byl vytvořen postupný disktrétní analytický výpočet. Diskretizace spočívá v časovém rozdělení výpočtu zkoumaných tepelných jevů po 1 hodině přes celý kalendářní rok. Jako hlavní okrajové podmínky výpočtu jsou definice [4] :

- orientace zkoumané fasády ke světovým stranám (zeměpisná délka, zeměpisná šířka, azimut fasády, nadmořská výška umístění fasády atd.),
- sluneční konstanty pro výpočet přímé a difúzní radiace, je uvažováno s hodnotou 1370 W/m^2
- geometrických vlastností fasády a větrané mezery (výška, šířka l_{bm} , vlastnosti vtoku a výtoku vzduchu u větrané mezery, atd.),
- korigovaný součinitel prostupu tepla fasády zahrnující i bodové činitele ukotvení fasády U_{korig} [3] ,
- tepelně technické vlastnosti obkladového materiálu (střední emisivita, barva, tloušťka, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, atd.,
- definici teplotních okrajových podmínek interiéru, tzv. korigovaná teplota interiéru podle ročního období $t_{i \text{ korig}}$, je zadávána teplota vnitřního vzduchu pro vybraný měsíc přes časový úsek jednoho dne,

- definici teplotních okrajových podmínek exteriéru t_c přes celé roční období, metoda harmonického kolísání teploty přes každý den v daném měsíci a roce,
- definice větrné oblasti a z ní počítané proudění vzduchu na spodním a horním líci fasády
- průvzdušnost (netěsnost) použitého typu opláštění (procentuální korekce)
- a další.

3.2.3. Vlastní výpočet se potom skládá z určení (výpočtu):

- výška Slunce nad obzorem h [°],
- azimutu Slunce a [°],
- číselného vyjádření úhlu mezi normálou osluněného povrchu a směrem slunečních paprsků pro svislou stěnu $\cos(\tilde{f})$,
- přímé dopadající sluneční radiace ve směru slunečních paprsků I [W/m^2],
- difuzní dopadající sluneční radiace I_d [W/m^2],
- přímé dopadající sluneční radiace na azimutem orientovanou stěnu I_p [W/m^2],
- celkové sluneční radiace dopadající na azimutem orientovanou stěnu I_o [W/m^2],
- rovnocenné sluneční teploty na azimutem orientovanou stěnu t_r [°C],
- korigované emisivity podle času (měsíce) výpočtu ϵ_{kor} [-],
- korigovaného přestupu tepla na vnější straně obkladu podle času (měsíce) výpočtu α_{kor} [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
- teploty vnějšího povrchu obkladu na azimutem orientované stěně T_{epob} [°C],
- přestupu tepla při volném proudění v mezeře α_{mez} [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
- součinitele prostupu tepla obkladu při měnící se α_{mez} [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
- přírůstku tepla od celkové radiace na šířce fasády l_{bm} pro danou celkovou výšku fasády h Q_{rad} [W],
- rychlosti větru v okolí fasády budovy podle větrné oblasti v_d a v_h [m/s]

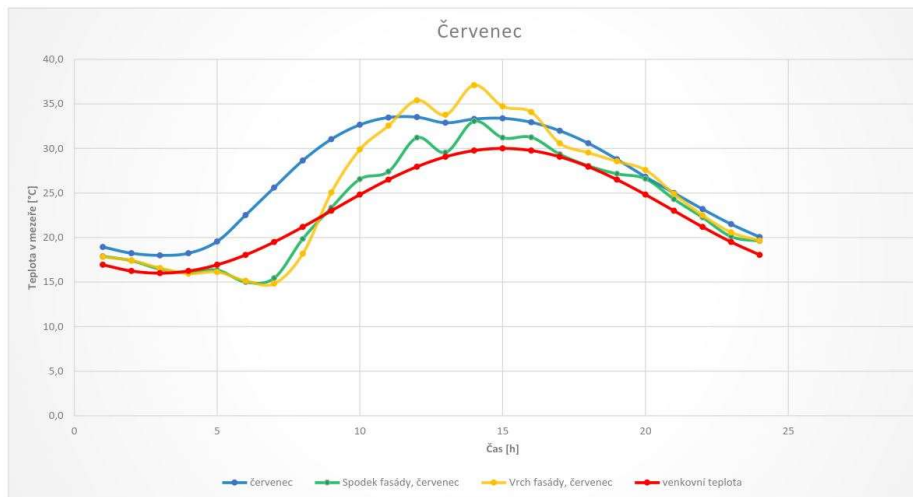
- výstupní teploty vzduchu ze vzduchové mezery mezi obkladem a tep. izolací stěny $t_{\text{vzmvyst}} [^{\circ}\text{C}]$,
- tepelného toku z vnitřního prostoru budovy do vzduchové mezery [ztráta znaménko -, zisk znaménko +] s U_{korig} nosné konstrukce po celé výšce fasády h na 1 bm fasády se zpožděním $Q_z [W]$,
- roční tepelné bilance po měsících nosné konstrukce po celé výšce fasády h na 1 bm fasády $Q [kWh/rok]$.

Pro vizualizaci uvedených výpočtů jsou dále prezentovány ukázky jednotlivých výsledků formou srozumitelných grafů. Jako příklad jsou prezentovány výsledky části jihovýchodní fasády s větranou mezerou, která byla realizována na objektu Jihomoravského Inovačního Centra v Brně. V rámci výzkumného projektu probíhalo na této fasádě celoroční měření jednotlivých teplot vzduchu (vně fasády, v prostoru větrané mezery, v místě instalované tepelné izolace) a to jak v místě dolní, tak i horní části fasády. Měřená data sloužila pro korekci dílčí veličin, jako je např. výše uvedena emisivita obkladu. Algoritmy výpočtů potom byly verifikovány na základě porovnání naměřených a vypočítaných dat.

Pro porovnání počítaných a měřených výsledků byly v prostředí excel sestrojovány dílčí makra. Naměřené a počítané výsledky byly v každém kroku porovnávány, výpočtové vztahy byly korigovány (např. emisivita povrchu obkladu fasády, přestupy tepla apod.).

Ukázka porovnání simulované počítané teploty v exteriéru (jako jedné z hlavních okrajových podmínek pro další podrobné výpočty) a naměřených dat v měsíci červenci je zobrazeno na Obr. 2. Obdobným způsobem byly porovnávány data pro každý měsíc.

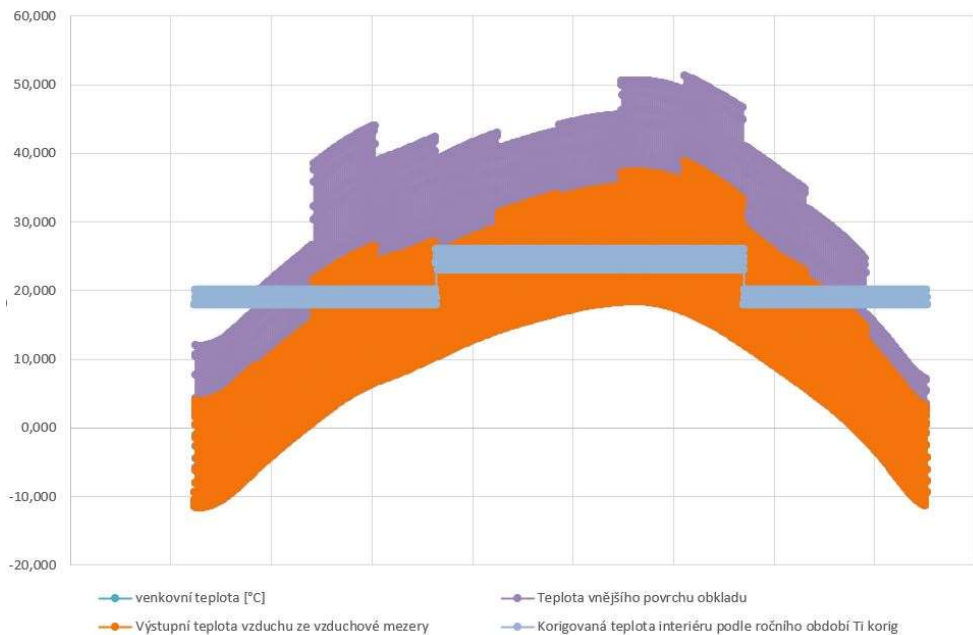
Z verifikovaných algoritmů potom můžeme provést roční výpočet výše uvedených dílčích veličin. Součtem po jednotlivých hodinách pak dostáváme komplexní obraz tepelných toků fasádou s větranou mezerou. Ukázky vybraných výstupů jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 2 Ukázka průběhu vypočítané (červená) a měřené teploty vzduchu v exteriéru (modrá), spolu s ukázkou naměřené teploty vzduchu v prostoru vzduchové mezery v dolní části fasády (zelená), horní části fasády (žlutá), k 21. červenci.

Přirozená konvekce vzduchu ve větrané mezeře má pozitivní vliv na snížení tepelné zátěže stěnou oproti klasickému kontaktnímu systému zateplení. Pokud by vzduch v mezeře větrané fasády neproudil (např. překážky parapety oken apod.), je tepelný zisk v letním období neakceptovatelný.

Na Obr. 3 je prezentována ukázka náhledu na vybrané průběhy vypočítaných veličin přes celý rok. Z obr. je patrné, že hodnota výstupního vzduchu ze vzduchové mezery může v letním období pro danou zkoumanou část jihovýchodní fasády dosahovat v extrémním letních podmínkách až 39°C v 10 hodin dopoledne při teplotě vzduchu v exteriéru +32°C. V zimním období ve slunečných dnech může teplota vzduchu vystupující ze vzduchové mezery dosahovat hodnot na 0°C (teplota vzduchu v exteriéru -10°C), což je způsobené nejen sluneční radiací, ale i vlastní tepelnou ztrátou, respektive přírůstkem tepla z prostoru interiéru budovy. Z tohoto důvodu je vhodné aplikovat systémy řízení průtoku vzduchu větranou mezerou (bylo zmíněno již výše).



Obr. 3 Průběh výstupní teploty vzduchu z větrané mezery $t_{vzmvyst}$ (oranžová), teploty vnějšího líce obkladu opláštění t_{epob} (fialová) a korigované vnitřní teploty vzduchu v budově $T_{i \text{ korig}}$ (modrá) za celý sledovaný rok pro vybranou jihovýchodní fasádu.

Provedením obdobného výpočtu bez uvažování obkladu opláštění a vzduchové mezery lze získat hodnoty teplot a tepelných toků pro systém standardního kontaktního zateplovacího systému (stejná barva vnější vrstvy) ETICS. Výsledné hodnoty tepelných ztrát a zisků po měsících pro část jihovýchodní fasády s výškou 15 m a šířce 1 bm jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Porovnání vypočítaných celkových hodnot tepelných toků pro uvažovaný typ fasády.

měsíc v roce	fasáda ETICS [kWh/měsíc]	oučasná větraná fasáda [kWh/měsíc]	chytrá fasáda s větranou mezerou [kWh/měsíc]	procentuální vyjádření snížení tepelného toku chytrou fasádou (%)
1	-41,75	-54,98	-47,02	14
2	-24,41	-35,52	-28,45	20
3	-7,95	-20,13	7,08	135
4	-1,66	-12,09	-12,09	0
5	4,02	-7,01	-7,01	0
6	7,24	0,98	0,98	0
7	12,27	6,09	6,09	0
8	17,35	11,23	11,23	0
9	11,95	6,43	6,43	0
10	-1,73	-9,41	6,44	168
11	-15,79	-24,55	-13,17	46
12	-36,38	-46,75	-41,73	11

Z výsledků uvedených v Tab. 1 je zřejmý přínos kontroly průtoku vzduchu větranou mezerou v zimním, ale hlavně v přechodném období roku, kdy je v exteriéru ještě nižší teplota vzduchu, ale již dostatečné sluneční záření pro eliminaci tepelné ztráty budovy. procentuální vyjádření porovnává rozdíly tepelných toků mezi standardní fasádou s větranou mezerou (posuzovaná jihovýchodní fasády) a chytrou fasádou s řízeným průtokem vzduchu v zimním a přechodném období.

Jedná se o významný poznatek, který má v technické praxi vysoký potenciál pro úspory energie na vytápění objektů. Jak ukazují výpočty, chytrá fasáda má díky řízení průtoku vzduchu proti standardním zateplovacím systémům v případě jihovýchodní orientace

významné úspory, jak na straně tepelné ztráty (průměrně až 40% snížení toku tepla), tak i na straně tepelných zisků (průměrně až 50%).

Simulace proudění vzduchu větranou mezerou zkoumané jihovýchodní fasády objektu pomocí CFD.

Zjednodušený model je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 Geometrie větrané mezery. Běžová = vstup vzduchu u paty. Zelená=výstup vzduchu u atiky, červená=mezery mezi obkladem, modrá=symetrická podmínka. Pravý prostřední obrázek okazuje model se zapnutou symetrií.

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ A KOMPARACE EXPERIMENTŮ A SIMULACÍ

4.1. Shrnutí výsledků měření „in situ“

Z výsledků provedeného měření vyplývá, že dochází k ovlivnění tepelně technických vlastností fasády a to v závislosti na ročním období, obecně řečeno na klimatických vlivech jako je teplota a proudění okolního vzduchu.

Experiment byl proveden na objektu za plného provozu, nikoli v laboratorních podmínkách, proto lze říci, že některé naměřené hodnoty mohou vykazovat nepřesnosti. Z hlediska praktické aplikace funkčnosti fasády se však lze o tyto výsledky obecně opřít.

Na základě výsledků experimentu nelze jednoznačně určit správnost návrhu fasády, jenž bude efektivně pomáhat k ideálním tepelně technickým vlastnostem obálky budovy. Vše je závislé na ideálním proudění vzduchu ve větrané dutině a druhu materiálu fasády samotné.

Jednoznačně je však z výsledků patrné, že v letním extrému je proudění vzduchu ve větrané vzduchové mezeře ustálené nebo téměř žádné. Oproti zimnímu extrému, kdy fasádou vzduch proudí velmi turbulentně a odvádí tak přebytečnou vlhkost z konstrukcí. Je zde ovšem na prvním místě otázka, zda je toto proudění v zimních extrémech žádoucí. Kromě pozitivního odvodu vlhkosti z konstrukce je zde velmi podstatný negativní faktor ochlazování konstrukcí. Z tohoto důvodu je na místě experimentální ověření funkčnosti, v závislosti na proměnných faktorech návrhu, pomocí numerické simulace.

Závěrem je nutno uvést, že pro naprosto přesné měření vlastností fasády a mikroklimatu uvnitř větrané dutiny by bylo nezbytné dodržet nebo provést některá další opatření:

- co nejpřesnější modelace fasády (kotvy, lokální nerovnosti),
- srovnání klimatických vlivů exteriéru v závislosti na funkčnosti větrané dutiny,

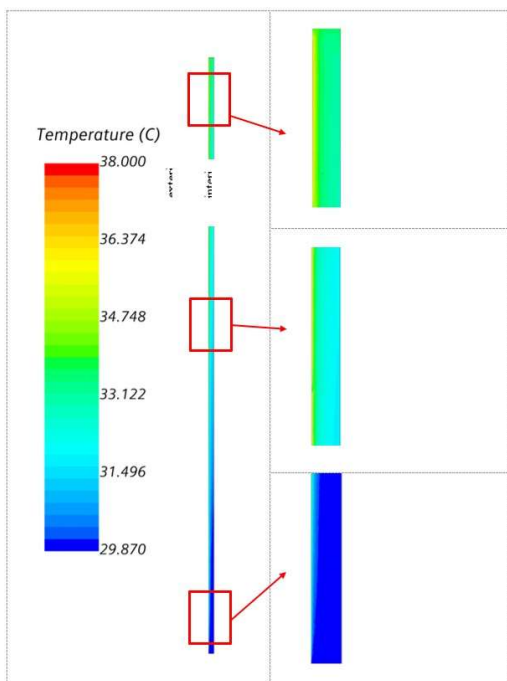
- eliminace vzniku možných vzduchových vírů u prostupů obvodovou konstrukcí v místě zavedení čidel,
- absolutně přesné stanovení difuze vodních par z obvodové konstrukce.

4.2. Shrnutí výsledků numerické simulace

Z provedeného numerického modelování je zřejmé, že pro provětrávané fasádní systémy je velmi důležitá výška celé fasády. Během numerického modelování se předpokládaly trvalé klimatické podmínky pro exteriér fasády.

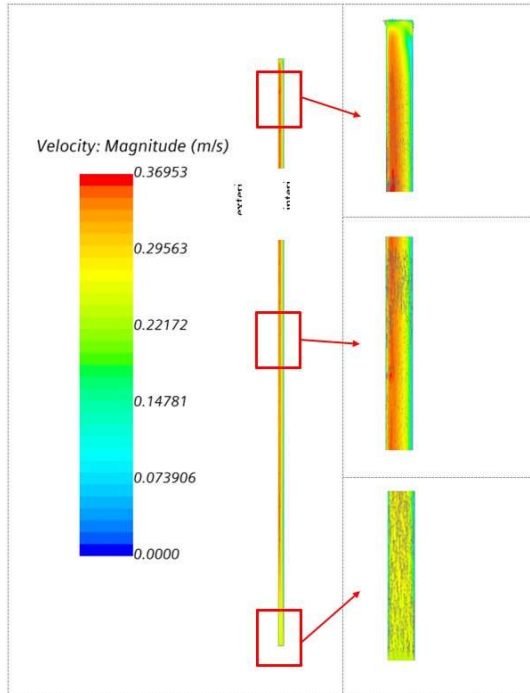
4.2.1. Výsledky simulace letního extrému

Pro letní extrém byl na základě analytických výpočtů v prostředí FSVM 21.červenec.



Obr. 5 Vizualizace teplotního pole na svislém řezu fasádou v letním teplotním extrémě.

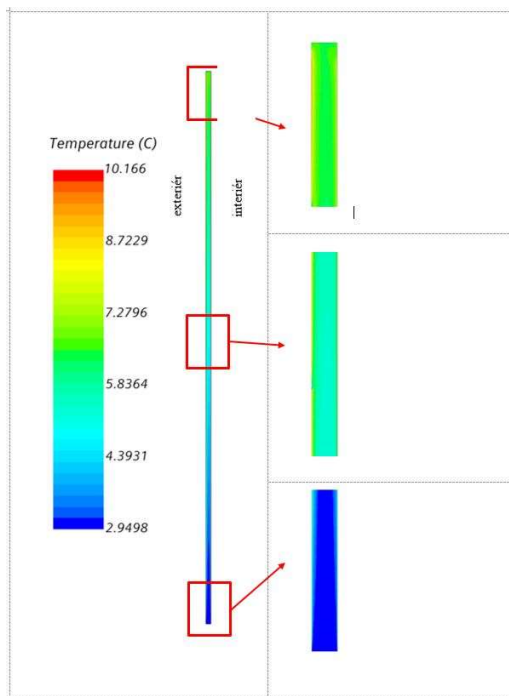
Z výsledků je patrný lineární růst teploty vzduchu po výšce fasády. Pouze u paty fasády se vzduch neohřívá takovou rychlostí. Toto je způsobeno jednak blízkostí sání venkovního chladnějšího vzduchu a jednak umístěním měřících bodů ve středu (ose) vzduchové mezery.



Obr. 6 Vizualizace rychlostního pole ve vzduchové mezeře na svislém řezu fasádou letní extrém.

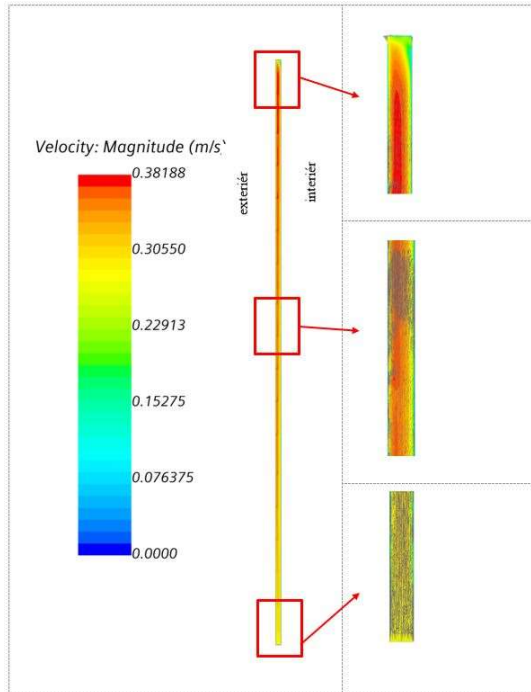
4.2.2. Výsledky simulace zimního extrému

Pro zimní extrém byl na základě analytických výpočtu zvolen leden.



Obr. 7 Vizualizace teplotního pole na svislém řezu fasádou v zimním teplotním extrémě.

Z výsledků je opět vidět, že teplota po výšce stoupá lineárně. Pouze u paty fasády se vzduch tak rychle neohřívá. Toto je způsobeno jednak blízkostí sání venkovního chladného vzduchu a jednak umístěním měřících bodů ve středu (ose) vzduchové mezery.



Obr. 8 Vizualizace rychlostního pole ve vzduchové mezeře na svislém řezu fasádou zimní extrém.

Rychlostní výškový profil se ohledem na proudění vzduchu zdola nahoru chová velmi podobně jako při proudění vzduchu v mezeře v letním extrému. Rychlost ve vzduchové mezeře je v zimním období mírně vyšší než v letním, kdy je potenciální energie díky teplému povrchu obkladu vyšší než kinetická energie větru v okolí fasády, v zimním období převažuje vliv kinetické energie větru v okolí fasády nad energií polohovou, tedy vztlakem chladného vzduchu.

Výsledky z provedené CFD simulace korelují s výsledky výpočtů pomocí algoritmů využívající analytické přístupy. Lze tedy verifikovat korektnost výpočtů pomocí FSVM software.

4.3. Komparace výsledků měření „in situ“ a numerické simulace

Aby mohla být správně verifikována vstupní data pro numerickou simulaci, je nezbytné provedení vzájemné komparace experimentální části výsledků z měření „in situ“ s výsledky numerických simulací. Jelikož se stabilně nedaří relevantně měřit všechny důležité vstupní veličiny, budou srovnána pouze data rozložení teplotních polí a rychlosti probíhající vzdušiny a sice na analogicky tvarovaných fasádách.

Experimentální měření „in situ“ probíhalo na fasádě administrativní budovy ve Vsetíně s výškou 8,775 m.

Pro měření byla použita anemometrická čidla SVH-14, se záznamem teploty a rychlosti probíhajícího vzduchu po 1 minutě. Měření probíhalo celý modelový rok.

Numerická simulace byla provedena části fasády s výškou 15 m a v poli o šířce 1 bm. Simulace je řešena jako třídímenzionální ustálená neizotermní děj s ideálním plynem.

Použité výpočetní modely:

- Ideal Gas,
- Coupled Energy,
- K-Epsilon Turbulence,
- Gravity.

Numerická simulace byla zaměřena na řešení dvou extrémních stavů, pro letní a zimní extrém. Pro každý z těchto stavů byly zvoleny rozdílné vstupní podmínky. Vstupní hodnoty těchto podmínek byly získány experimentálním měřením, viz. kapitola 3.2.2, vždy pro 12:00 hod. daného letního či zimního extrému.

Počáteční okrajové podmínky simulace letního extrému (červenec):

- rychlost větru v exteriéru 1,38 m/s,
- průtok vzduchu mezerou 100,4 m³/h na metr šířky fasády,
- teplota vzduchu v exteriéru 29,9°C,
- tepelný tok z exteriéru 10,7 W/m²,
- tepelný tok z interiéru -0,82 W/m².

Počáteční okrajové podmínky simulace zimního extrému (leden):

- rychlost větru v exteriéru 1,73 m/s,
- průtok vzduchu mezerou 125,5m³/h na metr šířky fasády,
- teplota vzduchu v exteriéru -8,1°C,
- tepelný tok z exteriéru 0 W/m²,
- tepelný tok z interiéru 6,2 W/m².

4.4. Shrnutí komparace výsledků měření „in situ“ a numerické simulace

Z grafických porovnání je zřejmé, že experimentální měření se významněji odlišuje od simulovaných výsledků s omezeným průtokem vzduchu. Je však potřeba zdůraznit, že se jedná o pilotní řešení, které doposud není možné s jinými výstupy porovnávat, neboť tyto zkrátka nebyly provedeny nebo nejsou prezentovány.

Je potřeba uvést, že numerické simulace byly prováděny na zjednodušeném geometrickém modelu. Numerické modely využívají zjednodušení ve 2 zásadních bodech. Příváděcí a odváděcí otvor s mřížkou je nahrazen volným otvorem, namísto toho je do modelu vřazena tlaková ztráta. Druhým bodem je poté řešení modelu na ideální symetrické doméně.

V průběhu modelového roku se mění stavové podmínky ovlivňující tepelné toky vzduchu ve větrané mezeře. Jedná se o množství oslunění fasády, v závislosti na emisivitě povrchu obkladu, které následně ovlivňují teplotu vzduchu ve větrané dutině. Z výsledku modelování však vyplývá, že v letním extrému je vlivem přirozeného proudění vzduchu zajištěn pozitivní vliv větrané dutiny na snížení tepelné zátěže budovy. Oproti tomu je jasné, že v zimním extrému je toto proudění nežádoucí. Sluneční radiace a vlastní tepelná ztráta budovy způsobují pohyb vzdušiny, která následně ochlazuje obálku budovy. Z

tohoto důvodu je vhodné zamyslet se nad využitím systému řízení průtoku vzduchu větranou dutinou.

Tyto poznatky byly ověřeny experimentálním měřením, kdy z výsledků jasně vyplývá, že v zimním extrému je proudění vzduchu velmi turbulentní. Přírůstek teploty po výšce objektu je potom konstantní, což by se dalo primárně interpretovat jako vliv tepelné ztráty budovy. V letním extrému je tento přírůstek teploty po výšce budovy rozdílný. Dá se tedy říci, že v tomto extrému vstupuje do výpočtu velmi zásadní měrou sluneční radiace.

Lze však říci, že samotný model je nezbytně nutné verifikovat pro zvýšení jeho přesnosti. Přesto je však možné konstatovat, že tato pilotní numerická simulace je v zásadě vypovídající a lze s touto metodou i nadále pracovat.

5. ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE

Předložená disertační práce pojímá problematiku provětrávaných fasádních systémů z hlediska funkčnosti a možných optimalizací.

Za zásadní poznatky tohoto výzkumu v oblasti provětrávaných fasádních systémů a jejich optimalizací lze uvést tyto:

- Větraná dutina funguje ideálně v letním extrému, kdy působí pozitivně na ochlazování budovy a přirozeným prouděním významně přispívá k tepelné stabilitě v interiéru.
- Naopak v zimním extrému je třeba proudění korigovat na nutné minimum z výše uvedených důvodů.
- Významným faktorem v letních extrémech je samotná sluneční radiace a s ní provázaná emisivita povrchu obkladu fasády.

Problematika správné funkce a návrhu provětrávaných fasádních systémů je však velmi složitá a doposud ne příliš prozkoumaná, z toho důvodu je nezbytné se základní fyzikální jevy, které tuto oblast provází, dále zabývat.

5.1. Závěry k dosaženým výsledkům

5.1.1. Ověření funkčnosti provětrávané fasády na referenční budově

Na základě provedených měření a následných komparací lze jednoznačně konstatovat, že funkčnost fasády je přímo závislá na rozdílu výšek přiváděcích a odváděcích otvorů a teplotě vzduchu uvnitř větrané dutiny. Na těchto dvou parametrech je závislá rychlost proudění vzduchu v dutině, kdy po stoupající výšce profilu fasády dochází k lineárnímu nárůstu teploty vzdušiny. Tento nárůst teploty má dvě příčiny. První příčinou je, v závislosti na materiálu fasády a jeho emisivitě, sluneční radiace. Druhou příčinou je potom samotná tepelná ztráta objektu, která ovlivňuje proudění převážně v zimních extrémech.

Při experimentálním měření byla zjištěna neefektivní funkce provětrávané fasády jak v zimním extrému, kdy proudění vzduchu probíhalo s lineárním nárůstem teploty po výšce fasády, v průměru o 4°C. Toto proudění je však v důsledku ochlazování obvodové konstrukce nežádoucí a nijak nepřispívá ke zlepšení tepelně technických vlastností obvodového pláště.

Při měření v letním extrému se podmínky uvnitř větrané mezery zásadně proměnily. Teplota místy vzrostla po výšce fasády až o 10°C. Tento nárůst způsobuje sluneční radiace. Proudění vzduchu se v tomto období téměř zastavilo, což v období letních extrému není ideální. Naopak by bylo velmi efektivní, kdyby vzduch proudil a pomáhal tak odvádět vodní páry a vlhkost z větrané dutiny a zároveň ochlazoval obvodovou konstrukci. Dále by tento efekt významně přispíval k teplotní stabilitě konstrukce a omezoval její přehřívání.

5.1.2. Optimalizace návrhu fasádních systémů pomocí výpočetních modelů

Nastavení numerického výpočtového modelu se ukázalo jako velmi dobrá varianta při návrhu samotného fasádního systému a předběžnému ověření jeho funkce a vlivu na objekt, respektive samotné obalové konstrukce objektu vzhledem k teplotní stabilitě

těchto konstrukcí. Vzhledem k tomu, že experimentální měření ukázalo neefektivitu provětrávání mezery, je třeba do výpočtu zahrnout korekci objemu vzduchu u přiváděcího otvoru.

Simulace ukázaly, že v zimních extrémech je žádoucí zmenšení průřezu přiváděcího otvoru nebo provětrané mezery fasády samotné a tím značně omezit rychlost a objem proudícího vzduchu. Tento pak následně přirozeně vytváří izolační vrstvu mezi vnějším obkladem fasády a obvodovou konstrukcí budovy. Vzduch ve vzduchové mezeře je dále vystaven tepelným tokům ze sálání předsazeného obkladu a tepelných ztrát objektu přes jeho obvodové zdivo.

Naopak v extrémech letních je ideální průřez přiváděcího otvoru a provětrávané mezery co nejvíce zvětšit a zajistit maximální možné proudění velkého objemu vzduchu. V návaznosti na toto opatření je třeba dbát při volbě jednotlivých vrstev kolem větrané mezery na stabilizování jejich polohy, aby nemohly vybočit, nebo jinak zasahovat do průřezu větrané mezery, protože i lokální zúžení větrané vzduchové mezery významně snižuje rychlost a množství proudění vzduchu a často tyto lokální nerovnosti nebývají součástí numerické modelace.

Z výsledků je zřejmý přínos kontroly průtoku vzduchu větranou mezerou v zimním, ale hlavně v přechodném období roku, kdy je v exteriéru ještě nižší teplota vzduchu, ale již dostatečné sluneční záření pro eliminaci tepelné ztráty budovy, tedy v tuto dobu má vzduchová mezera funkci „tepelného izolantu“. Fasádou s řízeným průtokem vzduchu v zimním a přechodném období má vysoký potenciál pro úspory energie na vytápění objektů. Jak ukazují výpočty, fasáda má díky řízení průtoku vzduchu proti standardním zateplovacím systémům v případě jihovýchodní orientace významné úspory, jak na straně tepelné ztráty (průměrně až 40% snížení toku tepla), tak i na straně tepelných zisků (průměrně až 50%).

6. SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov. Část 4: Výpočtové metody ÚNMZ Praha 2005, 60 s
- [2] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky. ÚNMZ Praha 2011. 56 s
- [3] ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov. Část 3: Funkční požadavky ÚNMZ Praha 2015
- [4] BIELEK, M.;, ČERNÍK, P.; TAJMÍR, M., *Aerodynamika budov*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00632-2.
- [5] ANDERSON, J.D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. 6. vyd. Hardcover: McGraw Hill, 1995. ISBN 0070016852
- [6] HÁJEK, J. *Modelování s využitím CFD*. 1. vyd. Brno: VUT Fakulta strojní, 2008.