

Ing. arch. Kristýna VALOUŠKOVÁ
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
 Katedra technických zařízení
 budov

Využití přirozeného větrání ve výškových prosklených budovách – jednoduché versus dvojité prosklené fasády

Use of Natural Ventilation in High-Rise Glazed Buildings – Simple versus Double Skin Glass Facades

Recenzent
 prof. Ing. František Drkal, CSc.

U výškových kancelářských budov se v současné době často využívá prosklená fasáda. Při použití přidané předsazené prosklené fasády je hlavní výhodou možnost jejího využití pro přirozené větrání. Studie je zaměřena na zjišťování vlastností jednoduché a dvojité prosklené fasády a jejich vlivu na mikroklima kancelářského prostoru při využití přirozeného větrání během různých okrajových podmínek. Na základě článku [1] jsou porovnávány 4 varianty chování tepelně-vlhkostního klimatu uvnitř kanceláře. Venkovní teplota je zde určena jako jedna z nejdůležitějších okrajových podmínek pro využití přirozeného větrání ve dvojitých fasádách. Na CFD simulacích zjednodušeného modelu kanceláře ve 25. a 49. podlaží budovy s celoprosklenou fasádou orientovanou na jih je zřetelně prokázán pozitivní vliv užití předsazené fasády.

Klíčová slova: dvojité prosklené fasády, přirozené větrání, tepelně-vlhkostní mikroklima

Nowadays it is very common to use glass facades for high-rise office buildings. The main advantage of the cavity glass facade is the possibility of its use for natural ventilation. The study is targeting the determination of simple and double skin glass facades properties and their effects on the microclimate in the naturally ventilated office space under different boundary conditions. 4 variants of temperature-humidity microclimate behaviour are compared on the basis of the paper [1]. External temperature is identified as one of the most important boundary conditions for the use of natural ventilation in the double skin facades. The positive impact of the cavity facades is clearly demonstrated by CFD simulations of a simplified models of offices on the 25th and 49th floors of a building with a south facing glass facade.

Keywords: double skin glass facades, natural ventilation, temperature-humidity microclimate

ÚVOD

Zásadním faktorem kvality budov je stav jejich vnitřního prostředí, který se vytváří v závislosti na provedení stavebních konstrukcí, provozu budovy a na aktuálních vnějších podmínkách. Vhodným výběrem typu tvaru budovy, procenta prosklení či orientací budovy můžeme významně snížit náklady nutné na provoz objektu – především na nutnost chlazení interiéru budovy v letním období. Trendem moderní architektury bývají velké prosklené plochy, které s sebou přinášejí kromě pozitivních (množství světla v místnostech, propojení s okolím) také negativní efekty, a to vysoké tepelné zisky v letním období, které je nutné eliminovat.

V roce 1984 Světová zdravotnická organizace (WHO) oznámila, že 30 % populace vyspělých zemí trpí syndromem nezdravých budov SBS (Sick Building Syndrom). V roce 2002 už tímto syndromem trpělo více než 60 % lidí. V současné době se v prosklených budovách převážně využívá nucené větrání, které má za důsledek častý výskyt SBS syndromu u osob pobývajících v těchto prostorách. Využití přirozeného větrání je jednou z možností, jak minimalizovat výskyt tohoto syndromu.

Chceme-li snížit dopad na životní prostředí a usilovat o zvýšení kvality vnitřních podmínek v kancelářských budovách, dostává se dvouplášťová fasáda čím dál více do středu pozornosti. Poskytuje mnoho možností pro úspory energie a zároveň vytváří příjemné vnitřní prostředí. Využití dvojitě fasády se stává součástí evropské architektury [2].

Vnější fasádní plášť zajišťuje ochranu proti povětrnostním podmínkám a zlepšuje akustické izolační vlastnosti proti venkovnímu hluku. Jedním z důvodů využití dvojitých fasád je možnost umístění stínících prvků do prostoru dutiny, čímž je umožněno jejich využití i ve výškových budo-

vách, kde to z důvodu povětrnostních vlivů není možné u fasád jednoduchých [3].

Vzduch v meziprostoru fasády je ohříván slunečním zářením. Díky možnosti otevření větracích prvků ve vnější fasádě dochází ke komínovému efektu. V letním období je teplý vzduch odváděn do venkovního prostředí a čerstvý chladnější je nasáván dovnitř. V zimě naopak bývají větrací prvky zavřené a meziprostor fasády působí jako nárazníková zóna mezi vnitřním a vnějším prostředím. V přechodném období se často využívá pomocné síly v podobě ventilátorů, které zvyšují proudění vzduchu, aby bylo zajištěno dostatečné přirozené větrání celé budovy [4].

Kromě slunečního záření je vítr klíčovým přirozeným stimulem pro tepelné chování budovy a pohyb vzduchu v dutině. Důležitým faktorem jsou rozdílné tlaky větru po výšce dutiny. Během větrných dní hraje síla větru významnou roli, coby pohonný prvek proudu vzduchu [5, 6]. V případě bezvětří nemůže být zajištěno dostatečné provětrání všech podlaží budovy.

Předchozí výzkum ukázal, že nevhodnější alternativou dvojitě prosklené fasády je využití jednoduchého zasklení Sng Low-E (s nízkou emisivitou) pro vnější fasádu a izolační dvojitě zasklení Dbl Low-E plněné argonem pro vnitřní fasádu. Nejvýhodnější vzdálenost fasád je 600 mm, kdy jsou nejvíce v rovnováze tepelné zisky a tepelné ztráty, v porovnání s dalšími zkoumanými variantami v šířce meziprostoru 300, 1000 a 1500 mm [7].

Tepelně-vlhkostní mikroklima

Tepelně-vlhkostní mikroklima patří mezi základní pilíře teorie vnitřního prostředí budov. Tepelně-vlhkostní složka prostředí je tvořena tepelnými a vlhkostními toky, které působí na organismus a ovlivňují tak jeho cel-

kový stav. Základní mikroklima v interiéru ovlivňuje vnější klima působící na budovu obvodovým pláštěm (především prosklenými plochami) spolu s vnitřními zdroji tepla a vodní páry. Hlavním zdrojem tepla a vodní páry v interiéru je člověk, jeho činnost a technologie v místnosti (osvětlení, výpočetní technika atd.) [8].

Pracovní prostředí v českých předpisech a dle standardů pro Severní Ameriku

Požadavky na pracovní prostředí stanovuje nařízení vlády č. 93/2012 Sb. [9]. Základní teplotní veličinou je operativní teplota t_o nebo výsledná teplota kulového teploměru t_g , která je vypočítána jako časově vážený průměr za efektivní dobu práce. Směrodatnou teplotní veličinou pro Severní Ameriku je teplota vzduchu v interiéru t_i . V tabulkách 1 a 2 jsou uvedeny mikroklimatické požadavky na pracovní prostředí.

Tab. 1 Mikroklimatické podmínky pro pracoviště třídy I a IIa s přirozeným nebo nuceným větráním [9]

Tab. 1 Microclimatic conditions in workplaces class I and IIa with natural or forced ventilation [9]

Třída práce	M [W/m ²]	$t_{o,min}$ nebo $t_{g,min}$ [°C] (1 clo)	$t_{o,max}$ nebo $t_{g,max}$ [°C] (0,5 clo)	v_a [m/s]	Rh [%]
I	≤ 80	20	27	0,01 až 0,2	30 až 70
IIa	81 až 150	18	26		

Tab. 2 Standardy a pokyny pro kvalitu vnitřního prostředí pro Severní Ameriku [10]

Tab. 2 Standards and directives for indoor environment quality for North America [10]

	$t_{i,min}$ [°C]	Rh [%]	v_a [m/s]
Limity	23 až 28 (letní období) 20 až 25,5 (zimní období)	30 až 65	≤ 0,25
Reference	ASHRAE Standard 55-2013 ISO 7730	ASHRAE Standard 55-2013 ISO 7730	WHO ISO 7730

Hodnocení tepelně-vlhkostního mikroklimatu

Pro hodnocení tepelného stavu slouží dvě metody – tradiční a adaptivní model tepelné pohody. Tradiční model tepelné pohody je založen na tepelné rovnováze organismu s okolním prostředím. Z tohoto modelu také vychází evropská norma pro hodnocení tepelného prostředí ČSN EN ISO 7730 – Ergonomie tepelného prostředí [11]. Adaptivní model tepelné pohody bere v úvahu, že ve skutečném prostředí působí na člověka různé podněty, které mohou ovlivnit jeho vnímání tepelné pohody oproti pobytu v klimatické komoře.

Norma [11] zavádí ukazatele PMV (předpověď středního tepelného pocitu) a PPD (předpověď procentuálního podílu nespokojených), které lze stanovit na základě faktorů ovlivňujících tepelnou rovnováhu člověka. Mezi tyto faktory patří tělesná činnost, oděv, teplota a relativní vlhkost vzduchu, střední radiační teplota a rychlost proudění vzduchu. Výsledkem hodnocení je předpovídání celkového tepelného pocitu, stupně diskomfortu osob vystavených mírnému tepelnému prostředí a stanovení podmínek tepelného mikroklimatu pro dosažení tepelné pohody. Tepelný pocit člověka je vyjádřen sedmidobovou stupnicí dle tab. 3.

Tab. 3 Stupnice tepelných pocitů

Tab. 3 Scale of Thermal Comfort

PMV	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Tepelný pocit	zima	chladno	mírně chladno	neutrální	mírně teplo	teplo	horko

Dle ASHRAE Standard 55-2013 [10] by se měly hodnoty PMV indexu pohybovat v rozmezí mezi $-0,5 < PMV < +0,5$. Hodnoty PPD indexu by měly dosahovat max. 20 % nespokojených.

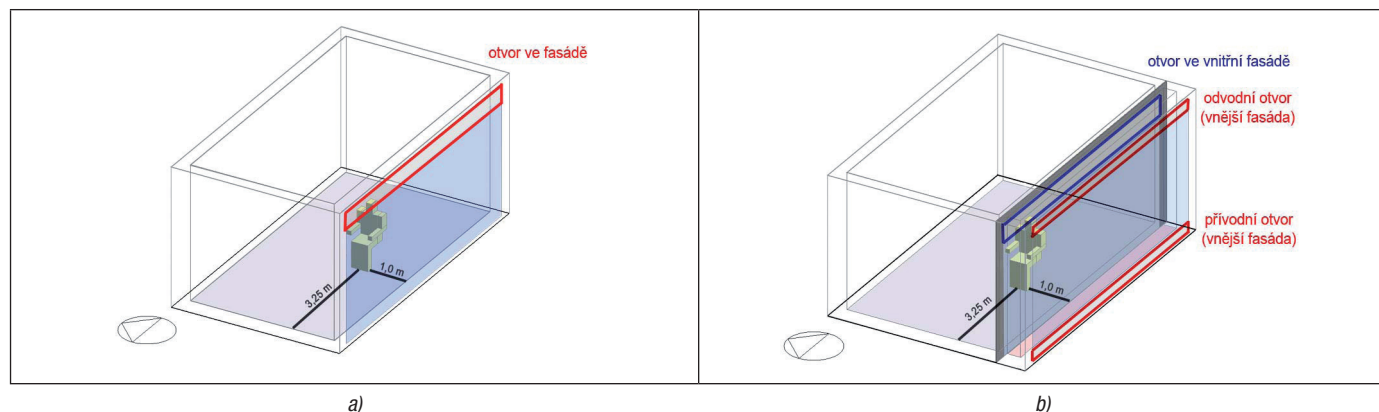
POPIS STUDIE

Pro tuto studii byl vytvořen zjednodušený model kancelářského prostoru, který byl následně použit pro CFD simulaci v softwaru DesignBuilder [13]. Pomocí výpočetního jádra EnergyPlus [14], kde byly specifikovány exteriérové okrajové podmínky typu lokalita objektu, materiálové řešení konstrukcí, stínící prvky, systém větrání, konkrétní datum a hodina, byly vypočítány interiérové podmínky pro následnou simulaci CFD (Computational Fluid Dynamics).

Interiérovými okrajovými podmínkami pro CFD získané z EnergyPlus byly teploty na površích konstrukcí, množství sluneční energie vstupující do interiéru a objemový průtok fasádními otvory.

Popis modelu

Jedná se o kancelářské prostory o rozměrech 4 x 7 m, situované ve 25. a 49. podlaží s prosklenou fasádou orientovanou na jih. Prosklená jednoduchá fasáda je navržena z Dbl Low-E Clr 6/13 mm plněné argonem se součinitelem prostupu tepla $U = 1,49$ W/m²K. Dvojitá transparentní fasáda má vnitřní zasklení také z Dbl Low-E Clr 6/13 mm Arg a vnější jednoduché zasklení je Sng Low-E Clr 6 mm s $U = 3,78$ W/m² K [12]. Rámy oken jsou navrženy hliníkové. Jako stínící prvky byly použity žaluzie s vysokou odrazivostí.



Obr. 1 Zjednodušený model kanceláře: a) s jednoduchou prosklenou fasádou, b) s dvojitou prosklenou fasádou

Fig. 1 Simplified model of the office: a) with simple glass facade, b) with double skin glass facade

Simulace je provedena na zjednodušeném modelu (obr. 1) přirozeného větrání s otevřením oken o velikosti 8 % z plochy prosklené jižní fasády. U jednoduché prosklené fasády je otevření umístěno v horní části fasády a u dvojitě prosklené fasády u vnějšího zasklení jsou přírodní otvory situovány dole, odvodní nahore, v celkové ploše 8 %. U vnitřního zasklení je větrací otvor umístěn v horní části fasády. Do modelu byl umístěn model sedící osoby, který představuje standardního pracovníka. Model pracovníka byl umístěn na střed místnosti 1,0 m od fasády, do místa předpokládané polohy pracovního stolu.

Na základě výpočtů EnergyPlus byly stanoveny teploty v interiéru, na povrchích konstrukcí a objemový průtok vzduchu proudícího do kanceláře přes otvory. Je uvažováno s vlivem infiltrace konstrukcemi.

Okrajové podmínky

Výpočty byly provedeny ve 4 variantách pro lokalitu Praha 6 – Ruzyně. Okrajové podmínky pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v tab. 4. Klimatické podmínky byly vybrány na základě studie N. Mignotti [1], kde jsou tyto teploty venkovního vzduchu uvedeny jako limitní pro možnost využití přirozeného větrání.

Tab. 4 Okrajové podmínky pro simulované varianty (dle EnergyPlus)

Tab. 4 Boundary conditions of the simulated variants (according to EnergyPlus)

	Rh_e [%]	CL [clo]	MR [met]	t_e [°C]	w_d [°]	v_w [m/s]	S_A [°]	S_{Al} [°]
Varianta č. 1 (8. 4. 2002 9.00)	33,07	0,61	1,00	13,5	12,5	1,00	113,52	30,09
Varianta č. 2 (26. 6. 2002 15.00)	26,14	0,61	1,00	14,0	327,5	8,25	244,02	49,08
Varianta č. 3 (4. 7. 2002 11.00)	51,40	0,57	1,00	21,7	60,0	4,33	142,17	58,38
Varianta č. 4 (3. 5. 2002 16.00)	33,25	0,57	1,00	21,4	332,5	5,93	253,31	33,17

- Rh_e relativní vlhkost venkovního vzduchu [%],
- CL tepelný odpor oblečení (*clothing level*) [clo],
- MR tepelný výkon člověka (*metabolic rate*) [met],
- t_e teplota venkovního vzduchu (*incoming air temperature*) [°C],
- w_d směr větru (*wind direction*) [°],
- v_w rychlost větru (*wind velocity*) [m/s],
- S_A azimut Slunce (*solar azimuth*) [°],
- S_{Al} výška Slunce nad obzorem (*solar altitude*) [°].

CFD simulace

Pro výpočet a vykreslení pohybu vzduchu a šíření tepla uvnitř kanceláře s jednoduchou a dvojitou prosklenou fasádou byla použita CFD simulace programu DesignBuilder [13]. DesignBuilder je program pro komplexní dynamickou simulaci budov s výpočtním jádrem EnergyPlus. Je využíván pro certifikaci budov, environmentální hodnocení (spotřeba energie, emise oxidu uhličitého), hodnocení tepelné pohody, výpočet denního osvětlení nebo CFD simulace.

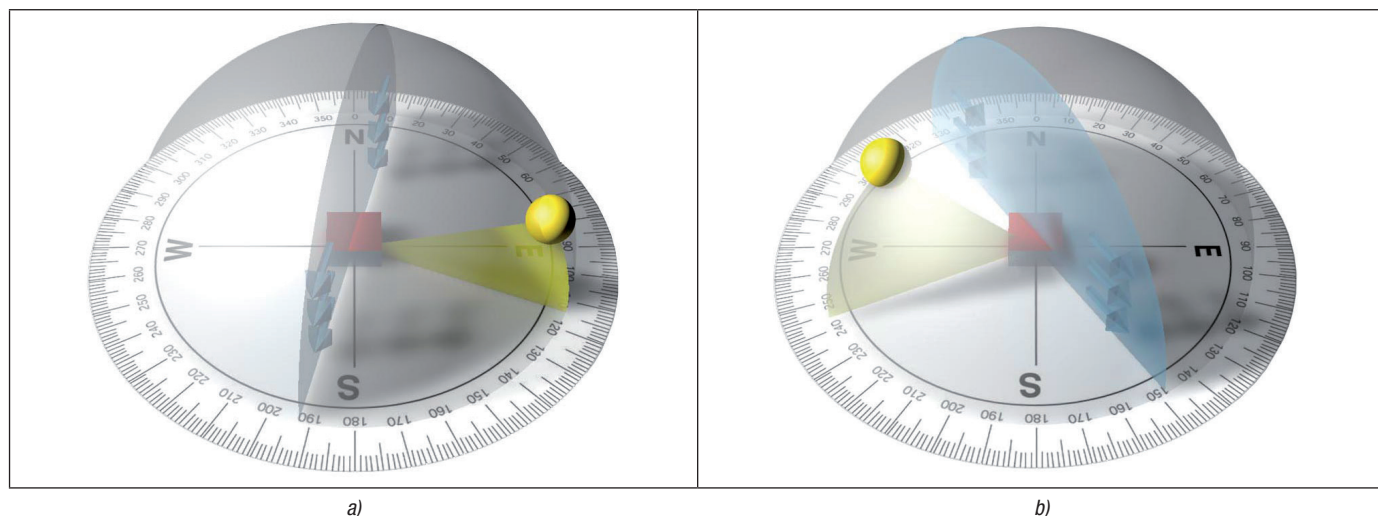
Pro CFD simulace byl použit turbulentní model $k-\epsilon$ s maximálním počtem iterací 5000. Většina simulací byla dopočítána po max. 3500 iterací. Velikost mřížky byla stanovena na 0,1 m s tolerancí 0,03 m.

VÝSLEDKY STUDIE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Následující část článku je věnována porovnávání vlastností jednoduché a dvojitě prosklené fasády ve čtyřech různých variantách uvedených v tab. 4. Při porovnávání tepelně-vlhkostního mikroklimatu interiéru kanceláře byla přepočítána relativní vlhkost vzduchu interiéru dle okrajových podmínek pro danou variantu. Tepelný odpor oblečení byl stanoven v závislosti na teplotě venkovního vzduchu a tepelný výkon člověka 1,0 met pro ekvivalentní práci vsedě. Pro celkové posouzení byly vybrány kanceláře ve 25. a 49. podlaží.

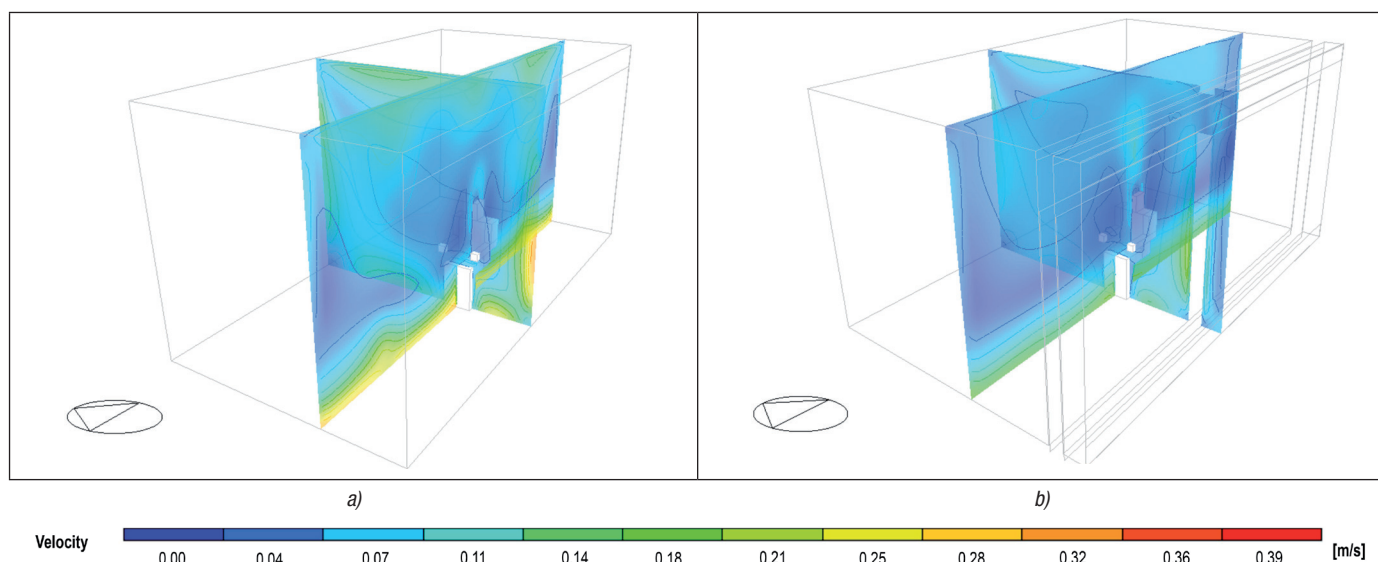
Studie N. Mignotti [1] zmiňuje teplotu venkovního vzduchu jako nejdůležitější a zároveň limitní okrajovou podmínku pro možnost využití přirozeného větrání u dvojitých fasád. V následující studii je prokázáno, že přestože jsou teploty venkovního vzduchu téměř srovnatelné, v kombinaci s ostatními okrajovými podmínkami, jako jsou rychlost větru, směr větru, výška slunce nad obzorem a azimut slunce, dosahujeme jiných hodnot vnitřního mikroklimatu.

Studie [1] stanovuje čtyři hodnoty teplot venkovního vzduchu, které byly specifikovány jako limitní pro Londýn, aniž by bylo třeba využití přídatného chlazení či vytápění. Přestože jsou v Londýně odlišné klimatické podmínky než v Praze, byly tyto teploty využity pro následnou simulaci. Cílem této studie není určení limitních teplot, ale dokázání, že důležitá je kombinace všech okrajových podmínek zmíněných výše, nikoli pouze jedné.



Obr. 2 Poloha slunce a směr větru dle okrajových podmínek pro variantu č. 1 (a) a variantu č. 2 (b) dle tabulky 4 (žlutá – poloha slunce, modrá – směr větru, červená – model kanceláře)

Fig. 2 Position of the sun and wind direction according to the boundary conditions for variant nr. 1 (a) and variant nr. 2 (b) according to the chart 4 (yellow – position of the sun, blue – wind direction, red – model of the office)



Obr. 3 Průběh rychlosti proudění vzduchu [m/s] v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 1 (8. 4. 2002, 9.00):

a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 3 Air flow velocity [m/s] in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 1 (8. 4. 2002, 9.00):

a) simple glass facade, b) double skin glass facade

Limitní teploty [1]:

- teplota venkovního vzduchu nižší než 14 °C (nutnost přídavného vytápění),
- teplota venkovního vzduchu mezi 14 °C a 18 °C (bez nutnosti přídavného vytápění),
- teplota venkovního vzduchu mezi 18 °C a 22 °C (bez nutnosti přídavného chlazení),
- teplota venkovního vzduchu vyšší než 22 °C (nutnost přídavného chlazení).

Teplota venkovního vzduchu nižší nebo rovna 14 °C

V následující části je sledováno tepelně-vlhkostní mikroklíma uvnitř kanceláře s jednoduchou a dvojitou prosklenou fasádou. Porovnávají jsou dvě varianty s podobnou teplotou venkovního vzduchu, ale rozdílnou rychlostí větru, směrem větru atd. (viz tab. 4).

Varianta č. 1

Tab. č. 5 obsahuje porovnání výsledků CFD simulace jednoduché a dvojitě prosklené fasády provedené v programu DesignBuilder. Okrajové podmínky byly stanoveny pro variantu č. 1 (8. 4. 2002, v 9.00) s venkovní teplotou 13,5 °C. Tučně jsou zvýrazněny vypočtené hodnoty, které neodpovídají limitům pro Českou republiku (tab. 1) a Severní Ameriku (tab. 2).

Výsledné hodnoty simulace CFD byly generovány v oblasti sedící osoby v několika různých polohách specifikovaných ve třetím sloupci tabulky.

Na obr. 3b je zřetelně vidět snížení rychlosti proudění vzduchu u provedení s dvojitou fasádou. Je to způsobeno předsazenou vnější fasádou, která působí jako nárazníková zóna a značně redukuje rychlost vzduchu vstupujícího dovnitř kancelářského prostoru. Uvnitř kanceláře s dvojitou fasádou dosahuje rychlost vzduchu max. hodnot kolem 0,18 m/s, což je v doporučených limitech (viz tab. 1, tab. 2). Oproti tomu v kance-

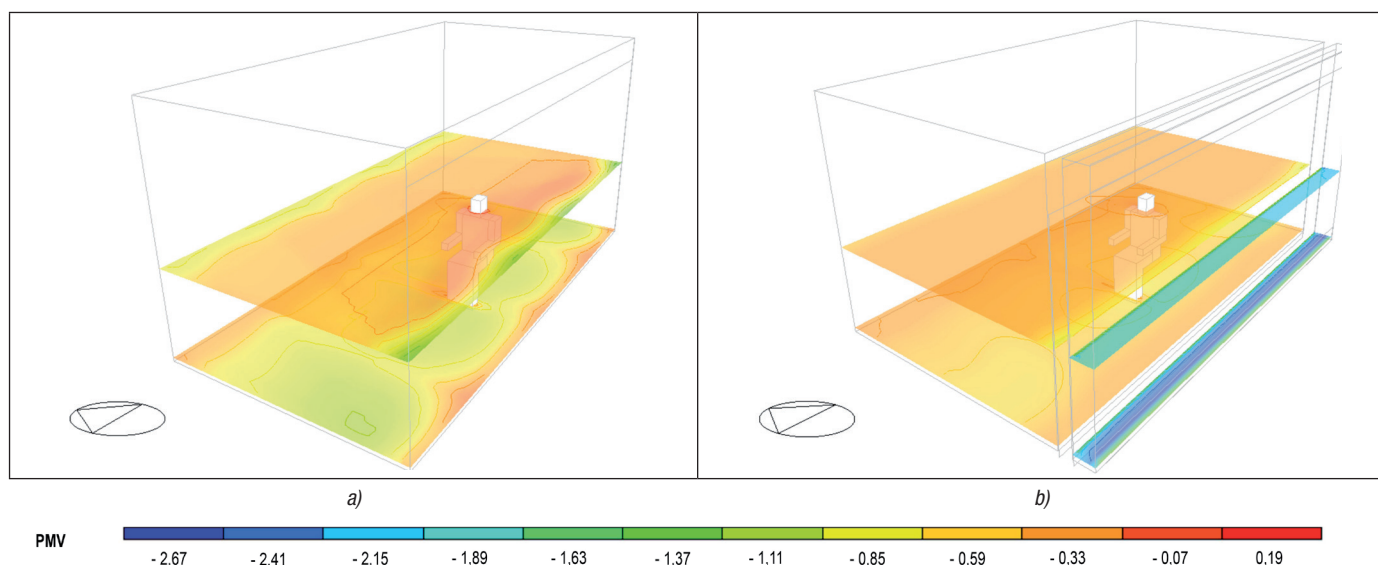
Tab. 5 Přehled výsledků pro variantu č. 1 (8. 4. 2002, 9.00) – 13,5 °C

Tab. 5 Summary of the results for variant nr. 1 (8. 4. 2002, 9.00) – 13,5 °C

Typ fasády		Jednoduchá prosklená fasáda		Dvojitá prosklená fasáda		
Relativní vlhkost v interiéru [%]		19,5		17,9		
Podlaží		25.	49.	25.	49.	
Okrajové podmínky pro CFD simulaci (dle výpočtů EnergyPlus)	V_a [m ³ /s]	do kanceláře	0,083	0,055	0,082	0,080
		do fasády	-	-	0,117	0,071
	t_a [°C]	kancelář	24,0	24,0	24,4	24,8
		fasáda	-	-	22,3	22,7
t_o [°C]	kancelář	25,3	25,2	25,1	25,2	
	fasáda	-	-	24,0	24,1	
Výsledky CFD simulace	V_a [m/s]	rozsah	0,001 → 0,39	0,001 → 0,39	0,001 → 0,25	0,001 → 0,22
		oblast těla	0,07	0,07	0,07	0,08
		oblast kotníků	0,33	0,32	0,18	0,18
	LMA [s]	rozsah	0,00 → 346,9	0,00 → 347,1	0,00 → 564,8	0,00 → 601,6
		okolí pracovníka	315,40	315,56	513,42	549,91
	PMV [-]	rozsah	-1,56 → -0,02	-1,59 → -0,04	-2,67 → 0,19	-2,71 → 0,12
		oblast kotníků	-1,00	-1,03	-0,59	-0,65
		oblast těla	-0,17	-0,18	-0,33	-0,40
	PPD [%]	rozsah	5,01 → 54,10	5,04 → 55,9	5,00 → 96,3	5,00 → 96,8
		kancelář	27,32	23,15	12,51	12,59

V_a objemový průtok vzduchu přes otvor [m³/s],
 t_a teplota vzduchu [°C],
 t_o operativní teplota [°C],
 V_a rychlost proudění vzduchu uvnitř kanceláře [m/s],
 LMA střední stáří vzduchu (local mean age of air) [s].

Poznámka: LMA je stáří vzduchu v určitém místě. Jedná se o dobu, která uplyne od vstupu molekul vzduchu do interiéru po dosažení určitého místa.



Obr. 4 Vykreslení PMV indexu v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 1 (8. 4. 2002, 9.00):

a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 4 Plot of the PMV index in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 1 (8. 4. 2002, 9.00):

a) simple glass facade, b) double skin glass facade

láři s jednoduchou prosklenou fasádou se rychlost vzduchu pohybuje od 0,001 m/s až do 0,39 m/s. V oblasti kotníků sedícího pracovníka rychlost proudění vzduchu dosahuje hodnot až 0,33 m/s, což způsobuje pocit průvanu a celkového diskomfortu.

Na obr. 4 je vykreslen průběh PMV indexu v závislosti na okolních faktorech, kterými jsou tělesná činnost, oděv, teplota a relativní vlhkost

vzduchu, střední radiační teplota a rychlost proudění. V případě kanceláře s jednoduchou prosklenou fasádou se hodnoty pohybují od -1,0 do -0,2, což podle stupnice tepelných pocitů (tab. 3) znamená mírný chlad až neutrální pocit. V oblasti kotníků jsou hodnoty nižší, což je způsobeno zvýšenou rychlostí vzduchu, která je mimo doporučené limity. U kanceláře s předsazenou fasádou se PMV index pohybuje v ideálních hodnotách kolem -0,5. Řez výsledků je veden v úrovni 1,2 m – v místě hlavy sedící osoby a v úrovni 0,1 m – v místě kotníků.

Tab. 6 Přehled výsledků pro variantu č. 2 (26. 6. 2002, 15.00) – 14,0 °C

Tab. 6 Summary of the results for variant nr. 2 (26. 6. 2002, 15.00) – 14,0 °C

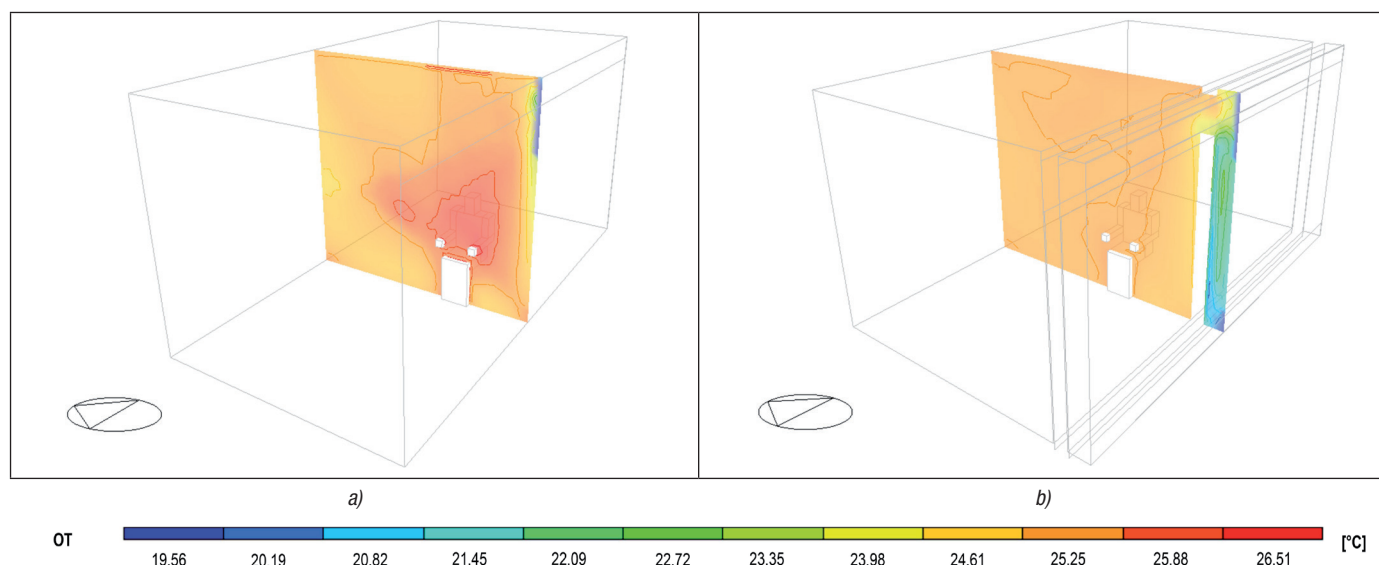
Typ fasády		Jednoduchá prosklená fasáda		Dvojitá prosklená fasáda		
Relativní vlhkost v interiéru [%]		15,5		14,9		
Podlaží		25.	49.	25.	49.	
Okrajové podmínky pro CFD simulaci (dle výpočtů EnergyPlus)	V_a [m ³ /s]	do kanceláře	0,088	0,066	0,066	0,059
		do fasády	-	-	0,134	0,130
	t_o [°C]	kancelář	24,1	24,1	24,5	24,4
		fasáda	-	-	22,5	22,4
t_o [°C]	kancelář	26,0	25,7	25,0	24,9	
	fasáda	-	-	25,5	25,4	
Výsledky CFD simulace	V_a [m/s]	rozsah	0,001 → 0,44	0,001 → 0,41	0,001 → 0,31	0,001 → 0,31
		oblast těla	0,12	0,11	0,06	0,06
		oblast kotníků	0,36	0,34	0,17	0,17
	LMA [s]	rozsah	0,00 → 296,75	0,00 → 332,0	0,00 → 654,9	0,00 → 703,0
		okolí pracovníka	269,77	292,81	476,26	575,20
	PMV [-]	rozsah	-1,61 → 0,16	-1,63 → -0,01	-2,60 → 0,92	-2,63 → 0,94
		oblast kotníků	-0,81	-0,89	-0,48	-0,47
		oblast těla	0,00	-0,16	-0,25	-0,29
	PPD [%]	rozsah	5,00 → 57,04	5,0 → 57,79	5,00 → 95,31	5,00 → 96,8
		kancelář	19,19	19,40	10,09	13,35

Obrázek průběhu operativních teplot (obr. 5) uvnitř kanceláře s přirozeným větráním ukazuje, že v případě jednoduché prosklené fasády se operativní teplota pohybuje kolem 26 °C, zatímco v kanceláři s dvojitou prosklenou fasádou kolem 25 °C. Pokud tyto hodnoty porovnáme s tab. 1 a tab. 2 (kritéria pro tepelný komfort), zjistíme, že obě varianty splňují dané podmínky. Na obr. 4b je zřetelně vidět působení předsazené fasády na operativní teplotu uvnitř kanceláře a její homogenizaci. Index PPD v případě kanceláře s jednoduchou transparentní fasádou se pohybuje kolem 25 % nespokojených pracovníků. Oproti tomu u dvojitě transparentní fasády se tato hodnota pohybuje pouze kolem 13 %. Je tedy zřejmé, že překročení limitních hodnot pro rychlost proudění zvyšuje pocit diskomfortu u vyššího procenta pracovníků.

Varianta č. 2

V tab. 6 jsou porovnávány výsledky z EnergyPlus a CFD simulace jednoduché a dvojitě prosklené fasády v programu DesignBuilder. Okrajové podmínky pro variantu č. 2 byly stanoveny v den 26. 6. 2002 pro 15.00 hodin, kdy teplota venkovního vzduchu byla 14,0 °C. Tučně jsou opět zvýrazněny vypočtené hodnoty, které neodpovídají limitům pro Českou republiku (tab. 1) a Severní Ameriku (tab. 2).

Přestože ve variantě č. 2 je rychlost větru vyšší o 7 m/s, rychlost proudění vzduchu uvnitř kanceláře dosahuje podobných hodnot jako ve variantě č. 1.



Obr. 5 Průběh operativních teplot v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 1 (8. 4. 2002, 9.00):
a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 5 Operative temperature in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 1 (8. 4. 2002, 9.00):
a) simple glass facade, b) double skin glass facade

Můžeme tedy usuzovat, že velký vliv zde hraje směr větru. U jednoduché prosklené fasády se rychlost proudění vzduchu v úrovni podlahy, v oblasti kotníků pracovníka, pohybuje nad limitními hodnotami určenými standardy pro Českou republiku a Severní Ameriku (tab. 1, tab. 2). Tyto vysoké hodnoty způsobují průvan a pocit nepohodlí. Teploty uvnitř kanceláře jsou velmi podobné pro obě varianty, jak pro jednoduchou, tak pro dvojitou prosklenou fasádu. V případě dvojitě

prosklené fasády však vychází *PMV* a *PPD* index, tedy tepelný pocit člověka a procento nespokojených s vnitřní kvalitou prostředí, mnohem příznivěji než pro variantu s jednoduchou fasádou. *PMV* index se v tomto případě opět pohybuje v rozmezí od -0,5 až do -0,25, což považujeme za neutrální pocit. U jednoduché prosklené fasády se v oblasti kotníků *PMV* index pohybuje kolem hodnoty -0,9, což znamená pocit mírného chladna.

Tab. 7 Přehled výsledků pro variantu č. 3 (4. 7. 2002, 11.00) – 21,7 °C
Tab. 7 Summary of the results for variant nr. 3 (4. 7. 2002, 11.00) – 21,7 °C

Typ fasády		Jednoduchá prosklená fasáda		Dvojitá prosklená fasáda		
Relativní vlhkost v interiéru [%]		39,7		39,5		
Podlaží		25.	49.	25.	49.	
Okrajové podmínky pro CFD simulaci (dle výpočtů EnergyPlus)	V_a [m ³ /s]	do kanceláře	0,084	0,080	0,099	0,097
		do fasády	-	-	0,343	0,317
	t_a [°C]	kancelář	26,7	26,4	27,29	26,8
		fasáda	-	-	24,6	24,4
t_o [°C]	kancelář	27,7	27,4	27,8	27,4	
	fasáda	-	-	27,4	27,1	
Výsledky CFD simulace	V_a [m/s]	rozsah	0,001 → 0,35	0,001 → 0,35	0,001 → 0,35	0,001 → 0,34
		oblast těla	0,06	0,06	0,06	0,06
		oblast kotníků	0,26	0,25	0,19	0,19
	<i>LMA</i> [s]	rozsah	0,00 → 593,0	0,00 → 614,5	0,00 → 532,9	0,00 → 544,2
		okolí pracovníka	539,11	558,61	532,85	544,15
	<i>PMV</i> [-]	rozsah	-0,17 → 0,99	-0,34 → 0,38	-0,69 → 1,56	-0,69 → 1,51
		oblast kotníků	0,25	0,17	0,33	0,32
		oblast těla	0,89	0,68	0,74	0,72
	<i>PPD</i> [%]	rozsah	5,00 → 25,28	5,04 → 21,55	5,00 → 53,30	5,00 → 51,65
		kancelář	22,08	20,05	18,45	17,72

Venkovní teplota mezi 14 °C a 22 °C

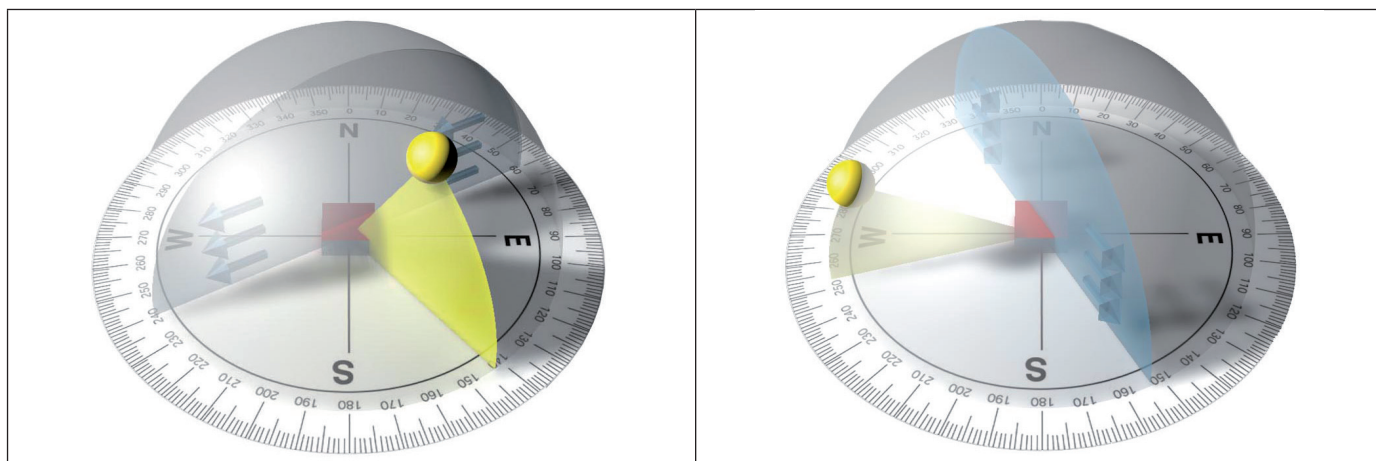
V následujících dvou variantách č. 3 a č. 4 je porovnáváno chování tepelně-vlhkostního mikroklimatu uvnitř kanceláře, pokud se venkovní teplota pohybuje kolem 22 °C. V obou variantách jsou teploty téměř srovnatelné, avšak ostatní okrajové podmínky, jako směr větru, rychlost větru atd., jsou rozdílné (viz tab. 4).

Varianta č. 3

V tab. 7 je porovnáváno několik výsledků CFD simulace jednoduché a dvojitě prosklené fasády z programu DesignBuilder. Okrajové podmínky pro variantu č. 3 byly stanoveny v den 4. 7. 2002 pro 11.00 hodin, kdy byla venkovní teplota 21,7 °C. Tučně jsou opět zvýrazněny vypočtené hodnoty, které neodpovídají limitům pro Českou republiku (tab. 1) a Severní Ameriku (tab. 2).

Navzdory skutečnosti, že teplota vzduchu a operativní teplota v interiéru kanceláře je v případě dvojitě prosklené fasády vyšší než u jednoduché, ostatní hodnoty důležité pro posouzení tepelně-vlhkostního mikroklimatu jsou příznivější právě pro tuto variantu.

Obraz rychlosti proudění vzduchu v kanceláři s přirozeným větráním pro variantu č. 3 s venkovní teplotou 21,7 °C má obdobný průběh jako ve variantě č. 1. V případě jednoduché prosklené fasády rychlost vzduchu uvnitř kanceláře dosahuje hodnot až 0,35 m/s a v oblasti kotníků hodnoty 0,26 m/s, které překračují stanovené limity (tab. 1, tab. 2). V přípa-

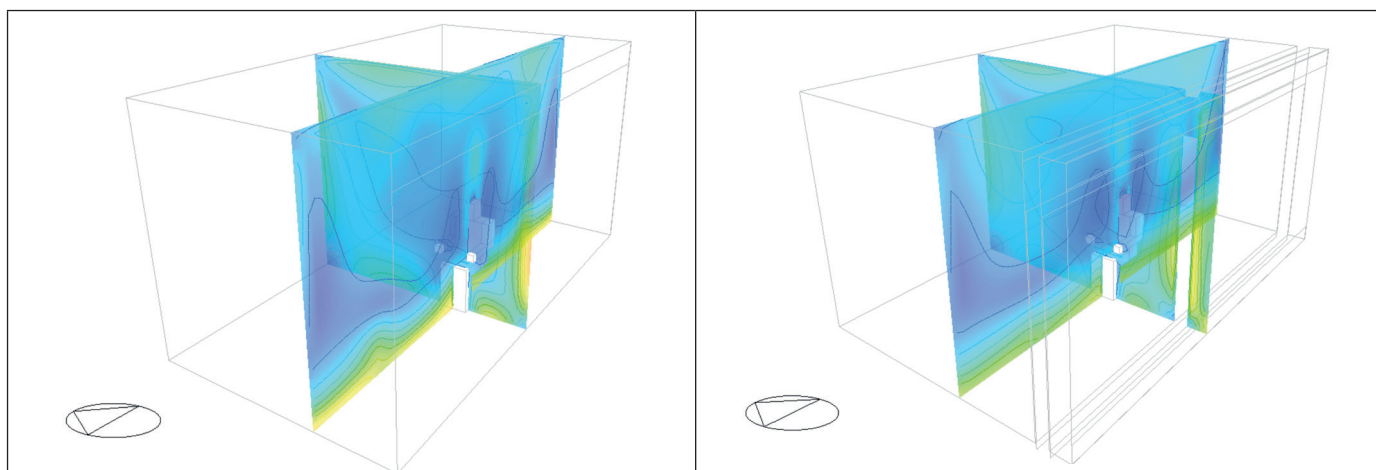


a)

b)

Obr. 6 Poloha slunce a směr větru dle okrajových podmínek pro variantu č. 3 (a) a variantu č. 4 (b) (žlutá – poloha slunce, modrá – směr větru, červená – model kanceláře)

Fig. 6 Position of the sun and wind direction according to the boundary conditions for variant nr. 3 (a) and variant nr. 4 (b) (yellow – position of the sun, blue – wind direction, red – model of the office)



a)

b)

Velocity 0,00 0,03 0,06 0,10 0,13 0,16 0,19 0,22 0,26 0,29 0,32 0,35 [m/s]

Obr. 7 Průběh rychlosti proudění vzduchu [m/s] v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 3 (4. 7. 2002, 11.00): a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 7 Air flow velocity [m/s] in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 3 (4. 7. 2002, 11.00): a) simple glass facade, b) double skin glass facade

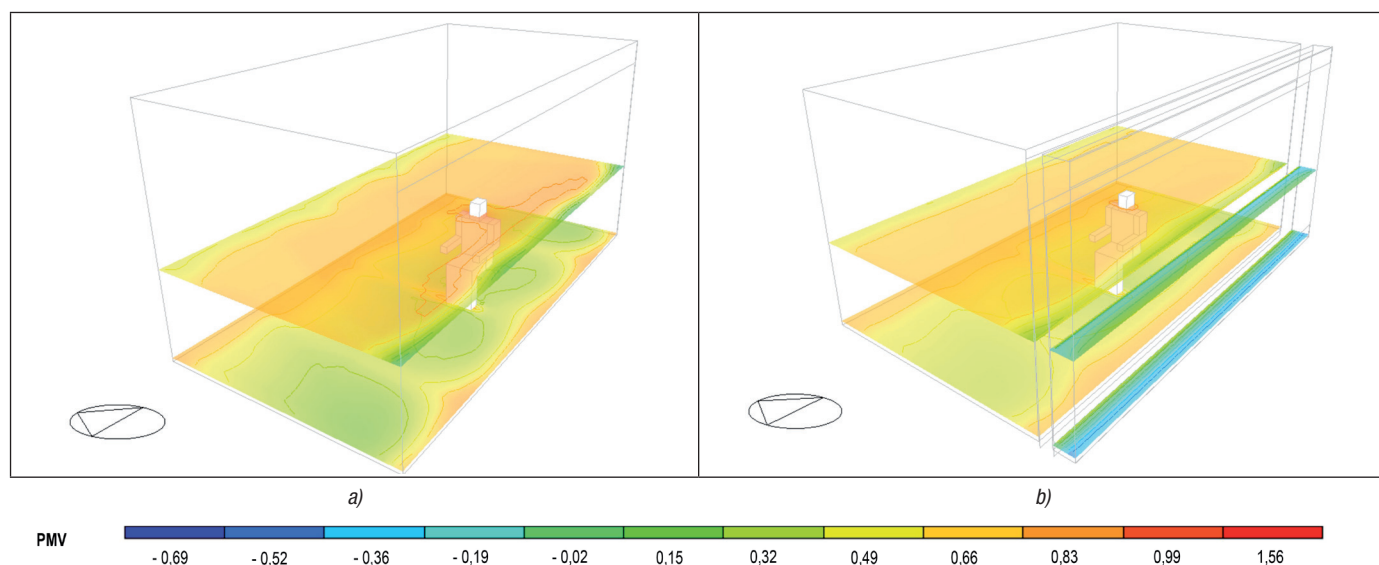
dě dvojitě prosklené fasády opět dochází ke značné redukci těchto rychlostí, a přestože v oblasti kotníků a u podlahy jsou rychlosti vyšší, nepřesahují s hodnotou 0,19 m/s výše zmíněné limity. Vyšší rychlost proudění vzduchu uvnitř kanceláře s jednoduchou prosklenou fasádou má za následek vyšší hodnotu *PPD* indexu, ten dosahuje hodnoty 22,08 %. Oproti tomu v případě dvojitě prosklené fasády je hodnota *PPD* indexu 18,45 %.

Předpověď středního tepelného pocitu u varianty č. 3 ukazuje, že přestože teploty v interiéru jsou přijatelnější pro kancelář s jednoduchou prosklenou fasádou, veličiny hodnotící tepelně vlhkostní mikroklima vycházejí lépe v kanceláři s dvojitou prosklenou fasádou. Velkým problémem u použití jednoduché fasády je rozdílnost hodnot v oblasti kotníků a hlavy pracovníka. V případě *PMV* indexu je tento rozdíl u jednoduché fasády 0,7, avšak u dvojitě pouze 0,4.

Průběhy operativních teplot ve variantě č. 3 jsou v obou případech mimo doporučené hodnoty (tab. 1, tab. 2). V případě dvojitě prosklené fasády je však obraz operativních teplot mnohem více homogenní, než je tomu v druhém případě. V případě jednoduché prosklené fasády je také hodnota *PPD* indexu vyšší, než je doporučená hodnota, tj. 22,08 %. Tento fakt je opět způsoben vyšší rychlostí v oblasti kotníků.

Varianta č. 4

V tab. 8 jsou porovnávány hodnoty pro variantu č. 4, která s obdobnou teplotou venkovního vzduchu jako varianta č. 3, liší se pouze o 0,3 °C, avšak ostatní okrajové podmínky způsobují odlišné chování uvnitř zkoumané kanceláře. Okrajové podmínky byly stanoveny pro teplotu venkovního vzduchu 21,4 °C dne 3. 5. 2002 v 16.00 hodin. Tučně jsou zvýrazněny vypočítané hodnoty, které opět neodpovídají limitům pro Českou republiku (tab. 1) a Severní Ameriku (tab. 2).



Obr. 8 Vykreslení PMV indexu v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 3 (4. 7. 2002, 11.00):

a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 8 Plot of the PMV index in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 3 (4. 7. 2002, 11.00):

a) simple glass facade, b) double skin glass facade

V předchozí variantě č. 3, s velmi podobnou teplotou venkovního vzduchu jako ve variantě č. 4, byly teploty uvnitř kanceláře téměř o 3 °C vyšší. Přestože je rychlost větru vyšší, 5,9 m/s oproti 4,3 m/s, rychlost proudění vzduchu v interiéru je mnohem nižší. V této variantě je tepelně-vlhkostní mikroklima mnohem příznivější. Jedinou výjimkou je vlhkost vnitřního vzduchu, která je však závislá na venkovní vlhkosti. Tepelný odpor oblečení se volí v závislosti teplotě ven-

kovního vzduchu, je tedy shodný s předchozí variantou, tj. 0,57 clo (tab. 7). Veličiny hodnotící tepelný komfort (*PMV*, *PPD*) vychází však méně příznivě. Hodnoty *PMV* indexu zde vychází záporné, tedy pocit mírného chladu. Tento fakt je způsoben nižší teplotou v interiéru. V případě kanceláře s dvojitou prosklenou fasádou jsou hodnoty *PMV* i *PPD* indexu v doporučených hodnotách, na rozdíl od kanceláře s jednoduchou prosklenou fasádou.

Tab. 8 Přehled výsledků pro variantu č. 4 (3. 5. 2002, 16.00) – 21,4 °C

Tab. 8 Summary of the results for variant nr. 4 (3. 5. 2002, 16.00) – 21,4 °C

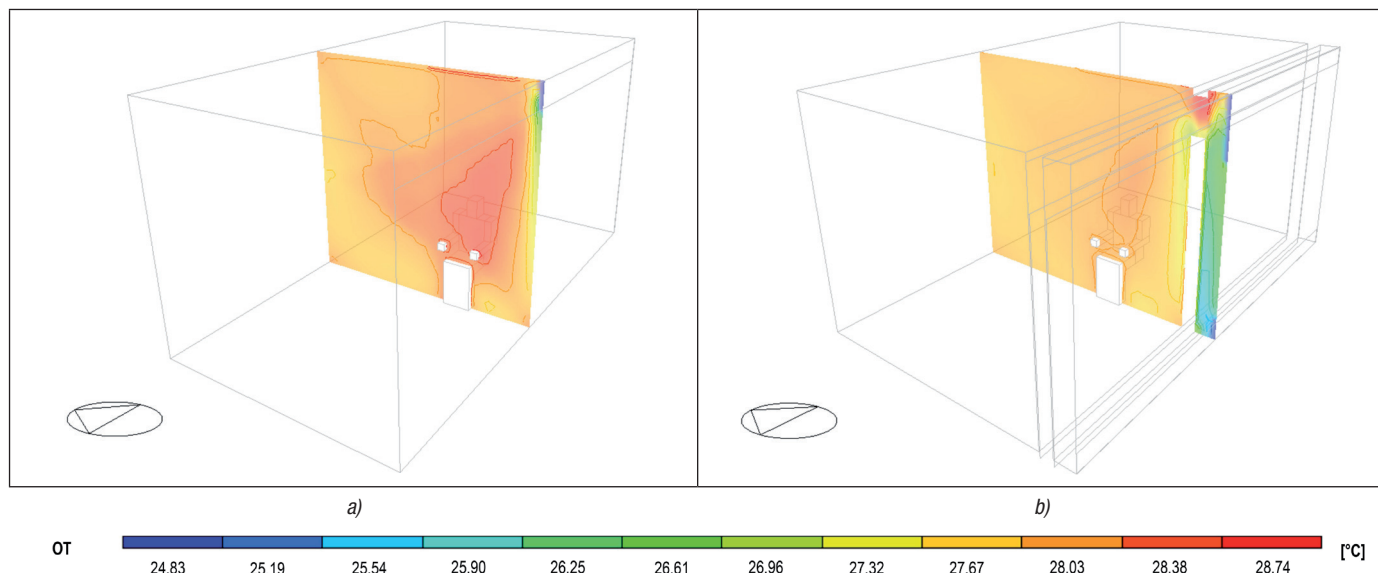
Typ fasády		Jednoduchá prosklená fasáda		Dvojitá prosklená fasáda		
Relativní vlhkost v interiéru [%]		29,3		28,4		
Podlaží		25.	49.	25.	49.	
Okrajové podmínky pro CFD simulaci (dle výpočtů EnergyPlus)	V_a [m ³ /s]	do kanceláře	0,067	0,040	0,073	0,070
		do fasády	-	-	0,155	0,100
	t_a [°C]	kancelář	24,1	24,3	24,7	24,7
		fasáda	-	-	23,1	23,3
t_o [°C]	kancelář	24,3	24,4	24,6	24,7	
	fasáda	-	-	23,9	23,9	
Výsledky CFD simulace	V_a [m/s]	rozsah	0,001 → 0,27	0,001 → 0,21	0,001 → 0,25	0,001 → 0,19
		oblast těla	0,07	0,09	0,09	0,16
		oblast kotníků	0,22	0,19	0,16	0,11
	LMA [s]	rozsah	0,00 → 793,7	0,00 → 607,9	0,00 → 807,8	0,00 → 1003,1
		okolí pracovníka	721,65	552,63	532,85	729,54
	PMV [-]	rozsah	-1,26 → -0,35	-1,12 → -0,41	-1,43 → -0,25	-1,34 → -0,28
		oblast kotníků	-0,77	-0,80	-0,68	-0,57
		oblast těla	-0,52	-0,61	-0,46	-0,47
	PPD [%]	rozsah	7,57 → 35,46	8,54 → 31,58	6,27 → 47,00	6,58 → 42,38
		kancelář	24,42	21,11	17,37	16,14

ZÁVĚR

Jak můžeme vidět na výsledcích simulací, dvojitá prosklená transparentní fasáda v porovnání s jednoduchou prosklenou fasádou dosahuje jednoznačně lepších výsledků v oblasti vnitřního mikroklimatu. V dnešní době, kdy je ve výškových budovách většinou používáno mechanické větrání, případně klimatizace, stojí za uvažování využití předsazené fasády s přirozeným větráním. Využitím přirozeného větrání můžeme značně snížit výskyt SBS syndromu, který je velmi často spojován se špatně navrženým nuceným větráním. Nevýhodou využití přirozeného větrání je ve většině případů nedostatečná relativní vlhkost v interiéru v zimním období. Tu je tedy třeba zajistit zvlhčováním vzduchu v kanceláři.

Jedním z velmi důležitých zjištění v průběhu zpracování této studie byl fakt, že nemůžeme jednoduše říci, že existuje limitní teplota pro určitou oblast, při které bychom mohli použít přirozené větrání bez nutnosti přitápění či chlazení. Důležitými faktory jsou jak orientace ke světovým stranám, tak orientace větru na větrací otvory, nebo výška slunce nad obzorem, rychlost větru atd. Nemůžeme jednoduše určit ony limitní faktory, jelikož důležitá je jejich kombinace. Těchto kombinací je však nespočet.

Přestože možností rozdílných okrajových návrhových podmínek je velmi mnoho, již na simulacích,



Obr. 9 Průběh operativních teplot v kanceláři s přirozeným větráním (25. podlaží) – varianta č. 3 (8. 4. 2002, 9.00):
a) jednoduchá prosklená fasáda, b) dvojitá prosklená fasáda

Fig. 9 Operative temperature in the office with natural ventilation (25th floor) – variant nr. 3 (8. 4. 2002, 9.00):
a) simple glass facade, b) double skin glass facade

kteří byly provedeny do současné doby, mimo jiné také pro nejvyšší rychlost větru v letním období, maximální teplotu atd., vždy vychází dvojitá transparentní fasáda mnohem příznivěji.

V otázce využití dvojitých či jednoduchých prosklených fasád je stále mnoho nejasného a možnost využití přirozeného větrání je jednou z majoritních otázek, kde je stále velký prostor a potenciál pro další zkoumání.

Kontakt na autora: kristynavalouskova@gmail.com

Poděkování: Prezentované výsledky byly získány za podpory grantu SGS15/015/OHK1/1T/11.

Použité zdroje:

- [1] MIGNOTTI, N., CHENVIDYAKARN, T., WOODS, A. W. *The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin façade*. Building and Environment. 2011, vol. 46, s. 808-823. ISSN 0360-1323.
- [2] OESTERLE, E. et. al. *Double skin Façades*. Mnichov: Prestel Verlag, 2001. ISBN 3-7913-2504-3.
- [3] DING, W., HASEMI, Y. a YAMADA, T. *Natural Ventilation Performance of a Double-Skin Façade with a Solar Chimney*. Energy and Buildings. 2005, vol. 37, no.4, s. 411-418. ISSN 0378-7788.
- [4] GRATIA, E. a A. de Herde. *Optimal Operation of a South Double-Skin Façade*. Energy and Buildings. 2004, vol. 36, no. 1, s. 41-60. ISSN 0378-7788.
- [5] GRATIA, E. a A. de Herde. *Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade?* Energy and Buildings. 2004, vol. 39, no. 4, s. 399-409. ISSN 0360-1323.
- [6] GRATIA, E. a A. de Herde. *Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade*. Solar Energy. 2007, vol. 81, no.4, s. 435-448. ISSN 0038-0924.
- [7] VALOUŠKOVÁ, K. *Heat losses and gains depending on the size of double transparent facade cavity*. 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air. 2014, s. 639-647. ISBN 978-962-85138-6-4.
- [8] JOKL, M. *Teorie vnitřního prostředí budov*. 1. Vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1986. 187 s.
- [9] *Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., kterými se mění nařízení vlády č.361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2012 Sb.*
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE. 2013. ISSN 1041-2336.

[11] ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Praha: Český normalizační institut, říjen 2006.

[12] eQUEST-DOE2, *Glass Library*.

[13] DesignBuilder version 4.2.0.054.

[14] EnergyPlus version 8.1.0.009



SE SERVOPOHONY
LUFBERG

MÁTE REGULACI VODY POD KONTROLOU

www.lufberg.eu