

Dr. Ing. Michal JAROŠ¹⁾
Ing. Jan FIŠER¹⁾

Simulace solárních zisků v dvojité energetické fasádě

Simulation of Solar Gains in Double-skin Energy Façade

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Článek se zabývá CFD simulací tepelných zisků a proudění ve dvojité solární energetické fasádě. Jižně orientovaná fasáda s výškou 5,6 m, šířkou vzduchové mezery 63 cm a celkovou plochou 123 m² je využívána jako zdroj tepla pro tepelné čerpadlo vzduch-voda. Cílem simulace bylo zjistit vliv šířky vzduchové mezery, ročního období a stínících žaluzií na teplotu odsávaného vzduchu a tepelný výkon fasády. S využitím zjednodušeného stacionárního 3D modelu bylo řešeno šest modelových situací. Vypočtený tepelný výkon fasády se v závislosti na ročním období pohybuje v rozmezí 8 až 15 kW při energetické účinnosti 14 až 19 %.

Klíčová slova: solární energetická fasáda, CFD simulace, tepelné čerpadlo

The article deals with the CFD simulation of heat gain and fluid flow in a double-skin solar energy façade. The south facing 5.6 m high façade, with an air gap width of 63 cm and a total area of 123 m² has been used as a heat source for an air-to-water heat pump. In the performance simulation, authors focused on investigating the impact of various air gap widths, climate conditions, and shading blinds, on the air temperature and the output heat rate of the façade. Six various situations were simulated using a simplified 3D steady-state model. The calculated result revealed that the output heat rate of the facade could be expected in the range of 8–15 kW and energy efficiency of 14–19 %, depending on the time of year.

Key words: solar energy façade, CFD simulation, heat pump

ÚVOD

Moderním, v posledních letech často využívaným způsobem zachycování solární energie jsou dvojité energetické fasády budov. Jde v podstatě o jednoduché solární kolektory vytvořené tak, že se před vlastní fasádu na osluněné straně budovy zavěsí transparentní, nejčastěji skleněná deska. Vzduch proudící dutinou mezi sklem a vlastní fasádou je ohříván slunečním zářením a následně jej lze v zimním a přechodném období roku využít k vytápění či přitápění budovy, celoročně pak jako zdroj tepla např. pro tepelné čerpadlo.

Jednou z hlavních otázek při návrhu solárních fasád je odhad jejich tepelného výkonu pro různá roční období a provozní stavy. Tento článek se zabývá numerickým modelováním tepelných zisků a proudění vzduchu ve dvojité energetické fasádě, instalované na objektu firmy Turbosol v Brně – Horních Heršpicích.

Uvedená problematika byla řešena v diplomové práci [1] z podnětu projekčně-inženýrské, manažerské, dodavatelské a servisní firmy IB Structure a.s., se sídlem v Brně, která byla projektantem i dodavatelem technologie a regulačního systému TZB. Součástí projektu je i software pro řízení a koordinaci tepelně energetických zdrojů. Hlavním cílem diplomové práce bylo zjistit vliv šířky vzduchové mezery, rozdílných klimatických podmínek v různých ročních obdobích a navržených provozních režimů na tepelný výkon a proudění vzduchu ve fasádě.

POPIS OBJEKTU

Objekt, který slouží jako servisní a kancelářská budova, se nachází na Kšírově ulici v Brně – Horních Heršpicích. Je umístěn v těsné blízkosti dálnice D-1, takže zdvojená fasáda zde plní mj. funkci protihlukové bariéry. Pro využití solární energie má budova výhodnou polohu, protože strana se zdvojenou fasádou má jižní orientaci. Objekt byl v době vzniku práce [1] ve výstavbě, představu o jeho konečné podobě lze však získat z počítačové vizualizace (obr. 1).

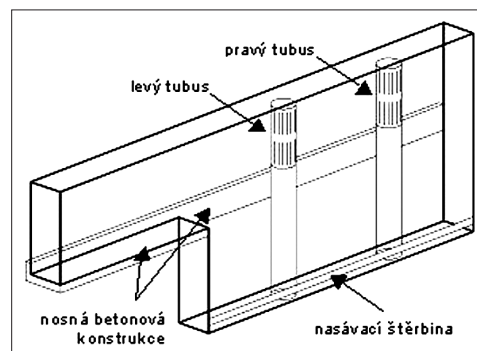
Dvojité fasáda vyplňuje takřka celou jižní stěnu budovy (obr. 1 až 3). Je navržena jako průchozí, o výšce 5,6 m a šířce mezery 63 cm. Celková plocha zasklení je cca 123 m². Vnější strana fasády je zasklena jednoduchým čířým, kaleným



Obr. 1 – Počítačová vizualizace objektu firmy Turbosol

sklem Float tloušťky 8 mm. Vnitřní strana je prakticky celá tvořena okny s izolačním dvojsklem Float Planitherm Futur 4-16-4 zasazeným v ocelových rámech. Mezi prvním a druhým podlažím jsou okna oddělena nosnou konstrukcí z betonu.

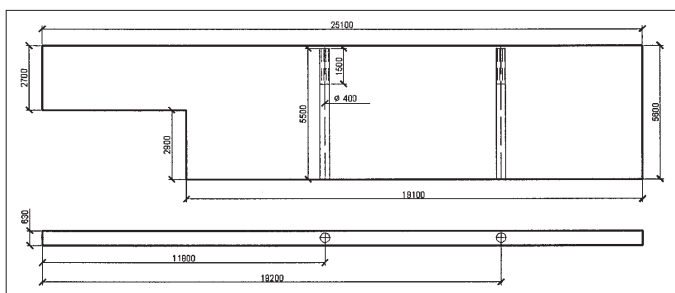
Fasáda pracuje v zimním období jako solární kolektor, který předeheřívá vzduch pro tepelné čerpadlo vzduch-voda umístěné v suterénu budovy. Jako protislušneční clona v letním období byly navrženy žaluzie umístěné uvnitř fasády na vnitřní straně předsazeného zasklení. Meziprostor fasády slouží také pro přirozené větrání přilehlých kanceláří.



Obr. 2 – Zjednodušený geometrický model fasády

Vzduch pro tepelné čerpadlo je nasáván z horní části fasády dvěma vertikálními tubusy z nerezové oceli o průměru 40 cm, jejichž vrchní část je opatřena výřezy. Venkovní vzduch vstupuje do fasády neuzavíratelnou štěrbinou, umístě-

¹⁾ Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně



Obr. 3 – Hlavní rozměry solární energetické fasády

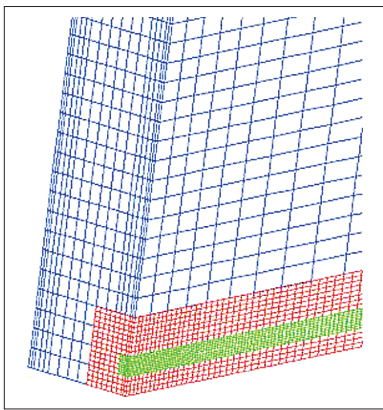
nou ve zdi pod spodním okrajem prosklení, s průtočnou plochou 1,1 m². Průtok vzduchu byl navržen podle podkladů výrobce tepelného čerpadla, které je vybaveno vlastním axiálním ventilátorem. Vzhledem k poměrně velké délce přívodního potrubí byl před tepelné čerpadlo zařazen ještě pomocný potrubní ventilátor s ruční regulační klapkou.

V zimním období bylo k dosažení maximálního tepelného zisku navrženo ponechat žaluzie vytažené, v letním období se předpokládá jejich spuštění. Při letním provozu může být prostor fasády navíc provětráván přirozeným prouděním vzduchu přes dálkově ovládané regulační klapky v horní části fasády. Proudící vzduch by měl odvádět větší část dopadající tepelné zátěže ven z fasády. V tomto případě se provoz tepelného čerpadla nepředpokládá.

CFD MODEL FASÁDY

Pro numerickou simulaci provozu solární fasády byl zvolen přístup, založený na metodách výpočtové mechaniky tekutin (Computational Fluid Dynamics – CFD). CFD simulace spočívá v numerickém řešení proudění a souvisejících jevů, zejména přenosu tepla, při daných okrajových podmínkách. Výsledkem je proudové a teplotní pole v řešené oblasti [2–5].

Pro simulaci byl použit program Star-CD, který je pro modelování solárního záření z běžně dostupných CFD programů nejvhodnější. Vzhledem k členitosti fasády a způsobu odsávání ohřátého vzduchu byla úloha řešena jako třírozměrná. Podle rozměrů skutečné fasády byl vytvořen zjednodušený geometrický model (obr. 2) s výpočtovou sítí kontrolních objemů. V místech předpokládaných velkých gradientů rychlosti nebo teploty (např. u nasávací štěrbině fasády, u konců odsávacích tubusů, v blízkosti skel a betonové nosné konstrukce), byla výpočtová síť zjemněna (obr. 4). To umožňuje získat detailnější výsledky v těchto místech a podporuje i konvergenci řešení. Výsledný CFD model obsahuje cca 270 000 výpočtových buněk.



Obr. 4 – Zjemnění výpočtové sítě v okolí vstupní štěrbině

Jednotlivé provozní stavy byly simulovány jako stacionární případy, přičemž pro intenzitu solárního záření a teplotu venkovního vzduchu byly použity průměrné denní hodnoty podle [6]. Simulace nestacionárního ohřevu fasády, která by lépe vystihovala řešený problém, se ukázala jako nerealizovatelná z hlediska doby výpočtu.

OKRAJOVÉ PODMÍNKY ŘEŠENÍ

Důležitou součástí každé CFD simulace je správné zadání okrajových podmínek. V tomto případě se jednalo zejména o co nejpřesnější stanovení vstupujícího

a vystupujícího solárního záření. Program Star-CD řeší odděleně obě spektrální složky záření – tepelnou i solární radiaci, avšak v obou případech používá tutéž hodnotu transmitance průhledných materiálů.

To však u mnoha typů transparentních materiálů neodpovídá jejich reálným fyzikálním vlastnostem (např. čiré sklo tloušťky 8 mm má hodnotu transmitance pro sluneční záření 0,77, avšak pro infračervené tepelné záření pouze cca 0,06 [7-8]). Transmitance vnějšího zasklení byla proto nastavena na hodnotu odpovídající tepelnému záření a intenzita dopadajícího slunečního záření byla nadhodnocena tak, aby radiační tok procházející oknem měl správnou hodnotu. Uvedený nedostatek výpočtového programu nicméně přesto poněkud zkresluje výsledky, neboť tento postup nelze uplatnit u odraženého solárního záření, které prochází zevnitř ven.

Dalším problémem, který je způsoben nedokonalostí výpočtového programu a který bylo nutno vyřešit náhradním způsobem, byla simulace solárního záření vycházejícího z prostoru fasády zadními okny. Poněvadž program Star-CD neumožňuje modelování dvou transparentních ploch za sebou, byla zadní stěna fasády (dvojitá okna) modelována jako neprůhledná a vystupující solární záření nahrazeno ekvivalentním tepelným tokem. Celková hustota tepelného toku q_p prostupujícího okny byla určena podle vztahu

$$q_p = -((t_s - t_i) \cdot k + q_{sol}) \quad (1)$$

kde

t_s [°C] – teplota vzduchu uvnitř fasády v blízkosti oken,

t_i [°C] – teplota vzduchu uvnitř budovy,

k [W.m⁻².K⁻¹] – součinitel prostupu tepla okny,

q_{sol} [W.m⁻²] – tepelný tok solárního záření, který vychází oknem ven.

Vzorec byl do výpočtu zahrnut použitím uživatelského podprogramu, který nastavoval příslušnou okrajovou podmínku.

Na výstupu z tubusů byla zadána rychlost proudění, odpovídající předepsanému průtoky vzduchu. Vektor proudění byl nastaven směrem ven. Vlastnosti mřížky tvořící nasávací část tubusů byly modelovány jejich tlakovou ztrátou, která byla zadána jako funkce rychlosti proudění v daném místě. Pro modelování vstupní štěrbině byla použita tlaková okrajová podmínka. Ostatní okrajové podmínky byly modelovány obvyklým způsobem. Pro modelování turbulence byl použit standardní $k-\varepsilon$ model.

ŘEŠENÉ VARIANTY

Na základě požadavků projekční firmy byly navrženy jednotlivé varianty řešení. Pro posouzení vlivu šířky fasády na provozní parametry byly navrženy varianty 1A, 1B a 1C se stejnými klimatickými podmínkami (letní provoz), avšak různou šířkou vzduchové mezery (40, 63 a 80 cm). Další tři varianty byly navrženy pro jednotnou šířku fasády (63 cm), avšak různé klimatické a provozní podmínky. Jejich výsledky slouží k posouzení jednotlivých provozních režimů a parametrů fasády v různých ročních obdobích. Modelován byl letní provoz s uzavřenými stínícími žaluziemi (varianta 2A), zimní provoz (2B) a provoz v jarním období (2C). Bližší specifikace jednotlivých modelových situací je uvedena v tab. 1.

Tab. 1 – Řešené modelové situace

Varianta	1A	1B	1C	2A	2B	2C
Roční období	léto			léto	zima	jaro
Simulovaný den	21. 7.			21. 7.	21. 1.	21. 3.
Šířka fasády [cm]	40	63	80	63		
Venkovní teplota [°C]	22,1			22,1	1,7	7,0
Intenzita solární radiace [W/m ²]	609			609	449	558
Výška slunce nad obzorem [°]	60			60	20	40
Stínící žaluzie	vytažené			spuštěné	vytažené	vytažené

Tab. 2 – Výsledky simulace provozu solární energetické fasády pro jednotlivé modelové situace

Varianta		1A	1B	1C	2A	2B	2C	
Simulovaný den			21. 7.		21. 7.	21. 1.	21. 3.	
Šířka fasády	[cm]	40	63	80	63			
Venkovní teplota	[°C]	22,1			22,1	1,7	7,0	
Stínící žaluzie		vytažené			spuštěné	vytažené	vytažené	
Výstupní teplota vzduchu	v levém tubusu	[°C]	28,6	28,7	28,8	29,4	12,4	18,6
	v pravém tubusu	[°C]	28,5	28,7	28,7	29,3	12,1	18,3
	průměrná	[°C]	28,55	28,7	28,75	29,35	12,25	18,45
Rozdíl výstupní a vstupní teploty		[K]	6,45	6,6	6,65	7,25	10,55	11,45
Hmotnostní průtok vzduchu fasádou		[kg/s]	1,286		1,283	1,36	1,33	
Tepelný výkon fasády		[kW]	8,40	8,60	8,66	9,43	14,54	15,44

Ve všech případech byl modelován provoz se zapnutým odsáváním vzduchu (objemový průtok 1,1 m³/s). Vnitřní okna i větrací klapky byly uzavřeny. Uvažován byl dokonale jasný den se střední intenzitou solární radiace a průměrnou teplotou vzduchu pro dané období. Poloha slunce na obloze odpovídá 12:00 h. Zdrojem klimatických dat byla literatura [6].

VÝSLEDKY VÝPOČTŮ

Za hlavní parametr, který určuje energetický přínos solární fasády, lze považovat rozdíl teplot Δt vzduchu na vstupu a výstupu z fasády, který určuje tepelný výkon fasády:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{in}) = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (2)$$

kde
 \dot{m}, \dot{V} – hmotnostní a objemový tok vzduchu fasádou,
 c_p a ρ – měrná tepelná kapacita a hustota vzduchu,
 t_{in}, t_{out} – teploty vzduchu na vstupu a výstupu z fasády.

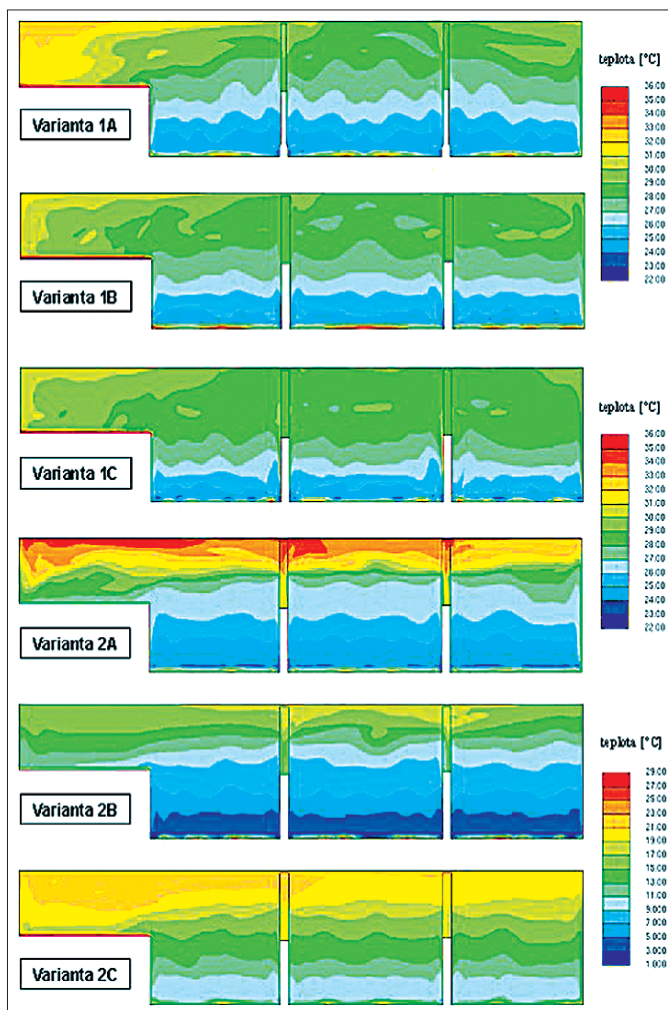
Přehled výsledků výpočtů pro jednotlivé modelové situace je uveden v tab. 2.

Posouzení vlivu šířky fasády

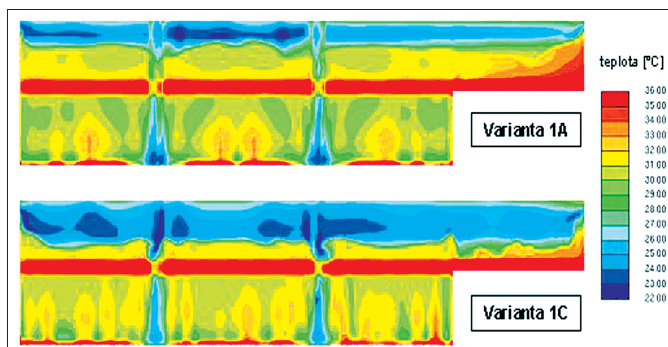
Jak je vidět, rozdíl teplot vzduchu na vstupu a výstupu a tedy i tepelný výkon fasády se pro jednotlivé modelované šířky prakticky neliší.

Bližší představu o teplotních poměrech ve fasádě získáme zobrazením teplotních polí v jednotlivých případech (obr. 5). Je patrné, že teplotní rozvrstvení (stratifikace) vzduchu ve fasádě je rovnoměrné a teplota vzduchu stoupá s výškou. Výjimkou je levá zvýšená část fasády, v níž se vytváří jakási „kapsa“ zachycující ohřátý vzduch. Zde jsou teploty podstatně vyšší než v ostatních částech fasády, přičemž tento rozdíl je nejvyšší u fasády s šířkou 40 cm, zatímco se zvětšující se šířkou fasády klesá. Je to zřejmě způsobeno sníženou výměnou vzduchu v této části fasády, v níž není umístěna vstupní štěrbina. K „promývání“ kapsy tak dochází pouze průniky vzduchu z ostatních částí fasády, které jsou při menší šířce fasády rychleji utlumeny. Tím se sníží i odvod zachycené energie a teplota vzduchu vzroste.

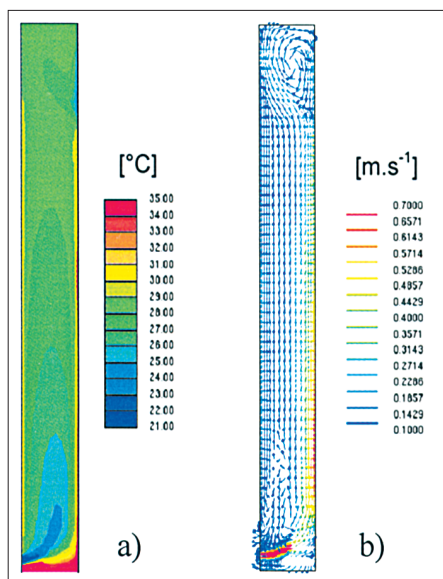
Ilustrativní je též zpětný pohled na teplotní pole v blízkosti zadní stěny fasády (obr. 6). Ve spodní části fasády lze pozorovat řadu stoupavých proudů vzduchu. Ty jsou typickým projevem přirozené konvekce ze dna fasády. Se zvětšující se šířkou fasády se jejich množství zvětšuje, což je důsledek snižující se rychlosti proudění vzduchu. Vyšší teploty vzduchu ve střední části a u dolního okraje fasády jsou způsobeny zahřátím betonové konstrukce, která pohltí – na rozdíl od dvojitých oken – většinu dopadajícího záření. Zvýšení teploty napomáhá i uzavřená cirkulace v dolním rohu fasády (obr. 7). Naproti tomu nižší teploty vzduchu v horní části fasády jsou způsobeny stínem, který vrhá střecha fasády. Šířka chladnější oblasti přitom roste s šířkou fasády, což odpovídá delšímu vrže-



Obr. 5 – Teplotní pole uprostřed fasády pro jednotlivé modelové situace



Obr. 6 – Teplotní pole v těsné blízkosti zadní stěny fasády (pohled zezadu)



Obr. 7 – Pole teplot a rychlostí proudění vzduchu (varianta 1B, příčný řez uprostřed mezi tubusy)

Pro simulace byla použita pouze šířka fasády 63 cm, která odpovídá skutečnosti. Z grafů teplotních polí vyplývá, že rozložení teplot ve fasádě je v různých ročních obdobích zhruba stejné jako v létě. Jediným rozdílem je velikost stínu vrženého střechou fasády, který je v jarním období menší – vzhledem k nižší výšce slunce nad obzorem – a v zimním období vůbec nevznikne.

Tepelný výkon fasády v zimním a jarním období je kupodivu vyšší než v létě (tab. 2). Příčinou je menší úhel dopadu záření na svislou stěnu a tím i větší množství zachycené energie, a to i přes celkově nižší intenzitu solární radiace. Nejvyššího výkonu dosahuje fasáda v jarním období, kdy je vzájemná kombinace polohy slunce na obloze a intenzity solární radiace optimální. Jelikož je však střední doba slunečního svitu v zimním a jarním období menší než v letním, bude celkové množství zachycené energie menší (tab. 3).

Překvapivé jsou i výsledky simulace provozu fasády se zataženými žaluziemi (varianta 2A). V tomto případě jsou teploty vzduchu ve fasádě i její výkon o něco vyšší než při vytažených žaluziích (srovnej obr. 5b a 5d), a to i přes vysokou odrazivost projektovaných hliníkových žaluzií. Spuštěné žaluzie totiž zachytí alespoň část energie solárního záření a konvekcí předají teplo vzduchu. V opačném případě není ve fasádě dostatek neprůhledných konstrukcí, které by záření zachytily. To je dáno velkými množstvími prosklených ploch na vnitřní straně fasády, které propouštějí dále do interiéru přes 70 % dopadajícího slunečního záření. Jeho energie se tak nezachytí v prostoru fasády, ale až v interiéru přiléhajících kanceláří.

Důsledkem je nízká energetická účinnost fasády, která se pohybuje v rozmezí cca 14 až 19 % (viz tab. 3). Tento výsledek kontrastuje s údaji z literatury [6], podle nichž dosahují energetické fasády při zimním vytápění účinnosti 55 až 65 %. Pro dosažení vyšší účinnosti by bylo potřeba zvýšit podíl neprůhledných stavebních konstrukcí ve vnitřní stěně fasády. Použití řešení navíc snižuje komfort vnitřních prostorů budovy, poněvadž vede k jejich přehřívání, příp. k vyšší spotřebě energie na jejich klimatizaci.

ZÁVĚRY

Z výsledků získaných CFD simulací vyplývá, že šířka fasády neovlivňuje v řešeném rozsahu hodnot její provozní parametry. Pouze při šířce fasády 40 cm se projevují drobné odchylky v rozložení teplot vzduchu v levé, zvýšené části fasády. Ty však podstatným způsobem neovlivňují teplotu odsávaného vzduchu.

Z hlediska různých ročních období poskytuje fasáda nejvyšší tepelný výkon v přechodných obdobích roku (jaro, podzim), kdy je množství zachycené energie vzhledem k poloze slunce na obloze a střední intenzitě solární radiace nej-

Tab. 3 – Odhad měsíčních hodnot zachycené energie a účinnosti fasády pro jednotlivé simulované režimy

Varianta	1A	1B	1C	2A	2B	2C
Simulovaný měsíc	červenec			leden		březen
Tepelný výkon fasády	[kW]	8,40	8,60	8,66	9,43	14,54
Průměrná doba slunečního svitu	[h]	270			46	142
Energie zachycená za měsíc	[kWh]	2268	2322	2338	2546	669
Energie dopadající za měsíc	[kWh]	13 131			5006	11 747
Účinnost fasády	[%]	17,2	17,6	17,8	19,3	18,7

nému stínu. Podobně jsou svislé oblasti nižší teploty přes celou výšku fasády způsobeny stíny odsávacích tubusů.

Posouzení vlivu ročního období a žaluzií

vyšší. Avšak i v zimním období je výkon fasády vyšší než v létě. Vzhledem ke kratší průměrné době slunečního svitu však bude celkové množství zachycené energie menší (tab. 3).

Tepelný výkon fasády je paradoxně nejvyšší při spuštěných stínících žaluziích, které zachycují sluneční záření. V opačném případě se negativně projevuje malé množství neprůhledných konstrukcí, v nichž by se záření pochtlo.

Třebaže uvedený způsob simulace vystihuje skutečnost pouze rámcově, byly s jeho využitím získány zajímavé a cenné výsledky. Na ně navazuje globální simulace celoročního provozu celého systému (včetně tepelných čerpadel a vodního akumulčního zásobníku) programem TRNSYS s využitím ročních klimatických dat, která je zpracovávána v rámci aktuálně řešené diplomové práce [9]. Výsledky obou přístupů by pak měly být porovnány s daty naměřenými na skutečném díle. Zda se však tento záměr podaří realizovat, závisí především na ochotě majitele objektu ke spolupráci.

Spojení na autora:

Energetický ústav, odbor termomechaniky a techniky prostředí, Technická 2, 616 69 Brno tel.: 541 143 282, fax: 541 143 269, e-mail: jaros@ime.vutbr.cz

Poděkování:

Práce vznikla s finanční podporou výzkumného záměru CEZ: J22/98:26210001. Příspěvek byl ve zkrácené podobě přednesen na konferenci Simulace budov a techniky prostředí 2004.

Použité zdroje:

- [1] Fišer, J.: Simulace provozních stavů solární energetické fasády. Diplomová práce, FSI VUT, Brno, 2004.
- [2] Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corp., New York, 1980.
- [3] Versteeg, H. K., Malalasekera, W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method. Longman Group Ltd., Harlow (UK), 1995.
- [4] Janák, M.: Simulácia transparentnej dvojplošťovej vetranej fasády. Sborník 2. nár. konf. „Simulace budov a techniky prostředí“, IBPSA-CZ, Praha, 2002, s. 59-64.
- [5] Jaroš, M., Katolický, J.: Komplexní CFD simulace solární ohřívání prostoru. Sborník 2. nár. konf. „Simulace budov a techniky prostředí“, IBPSA-CZ, Praha, 2002, s. 65-69.
- [6] Cihelka, J.: Solární tepelná technika. Nakladatelství T. Malina, Praha, 1994.
- [7] Vaverka, J.: Transparentní izolace. Větrání, vytápění, instalace, 8, č.2, 1999, s. 94-99.
- [8] Ražnjević, K.: Termodynamické tabulky. Alfa, Bratislava, 1984.
- [9] Skála, V.: Využití solární energie zachycené dvojitou fasádou budovy tepelnými čerpadly. Diplomová práce, FSI VUT, Brno (ve zpracování).

* Simulační program budov

„DK-Solar“ společnosti Delzer Kybernetik je simulační program budov, který napodobuje i neobvyklé situace a stavební díly blíže k realitě. Běžné programy se nedokáží vypořádat se skokovými změnami, jako např. otevře-li se okno, nebo když z kondenzuje vzdušná vlhkost. Tyto nelinearity popisuje „DK-Solar“ analyticky přesné systémy diferenciálních rovnic. Bližší informace na www.delzer.de.

CCI2/2005

(Ku)