

Agregované tepelné charakteristiky budov - Část 4: plocha solární apertury obálky budovy

Pavel Kopecký, Kateřina Sojková

UCEEB, Univerzitní centrum pro energetiku efektivní budovy, Třínecká 1024, Buštěhrad

Abstrakt:

Obálka budovy je v kontinentálním klimatu tradičně hodnocena podle její tepelně izolační schopnosti. Vzhledem k tomu, že se tepelně izolační kvalita obálky budovy v posledních desetiletích značně zvýšila, představují solární tepelné zisky mnohem důležitější podíl v tepelné bilanci budovy, než tomu bylo v minulosti. Kvalita obálky budovy by mohla být posuzována i svou schopností vnášet do budovy solární tepelné zisky. Taková agregovaná tepelná charakteristika obálky budovy by měla sdružovat vlastnosti jako např. plocha zasklení v každé fasádě, propustnost zasklení pro solární energii, účinnost pevných stínících překážek či skutečný provoz pohyblivých stínících prvků. K popisu solárních tepelných zisků se v tomto článku používá náhradní horizontální účinná sběrná plocha, která byla nazvána jako plocha solární apertury obálky budovy. Plocha solární apertury se v příspěvku nejprve teoreticky definuje, posléze se odvozuje způsob výpočtu z dostupných údajů o budově. V příspěvku jsou odvozeny přibližné přiměřené hodnoty měrné plochy solární apertury obálky kritické místnosti, které by pravděpodobně měly vést k výraznému snížení rizika jejího přehřívání.

Klíčová slova: tepelná bilance budov, solární tepelné zisky, přehřívání, plocha solární apertury

Aggregated thermal properties of the whole buildings – Part 4: The effective solar aperture of a building enclosure

Abstract:

The building enclosure is traditionally assessed by the quality of thermal insulation in the continental climate. As the thermal insulation of a building enclosure has substantially improved over the last decades, solar heat gains comprise more important fraction in thermal balance of a building. The quality of the whole building enclosure could also be assessed by its composite ability to transmit solar heat gains into the internal environment. Such thermal characteristic should aggregate properties like glazing area in each facade, glazing g-value, the efficiency of fixed shading provisions and the operation of movable shading devices in one composite property. In this paper, the surrogate horizontal effective collector area is used for the characterization of solar heat gains through a building enclosure. The aggregated property is called the effective solar aperture of a building enclosure. Finally, the approximate reasonable values of the effective solar aperture are derived. The reasonable values should lead to a significant reduction in the risk of overheating.

Key words: thermal balance of a building, solar heat gains, overheating, solar aperture

Obsah:

1. Úvod	4
2. Plocha solární apertury obálky budovy	4
Odvození	4
Vliv neprůsvitných prvků obálky budovy.....	5
Interpretace veličiny	5
3. Případová studie plochy solární apertury obálky modelového domu.....	6
Modelový rodinný dům.....	6
Poměry dávek ozáření.....	6
Korekční činitelé stínění	7
Plocha solární apertury	7
4. Přiměřený solární tepelný zisk pro snížení rizika přehřívání kritické místnosti.....	9
5. Diskuze	11
6. Závěr.....	12
Literatura.....	12
Poděkování.....	12

Značení veličin:

Označení	Popis	Jednotka
α_s	Pohltivost povrchu pro solární záření	-
A_s	Plocha solární apertury obálky budovy	m^2
A_{col}	Účinná sběrná plocha stavebního prvku	m^2
$A_{s(XI.-II.)}$	Průměrná hodnota plochy solární apertury v období listopad až únor	m^2
$A_{s(V.-VIII.)}$	Průměrná hodnota plochy solární apertury v období květen až srpen	m^2
A_s/V	Měrná plocha solární apertury (vzhledem k objemu budovy)	m^2/m^3
V	Objem budovy či kritické místnosti (z venkovních rozměrů)	m^3
H	Dávka ozáření	$J/(m^2 \text{období})$
U	Součinitel prostupu tepla stavebního prvku	$W/(m^2K)$
Q_s	Teplo od solárních tepelných zisků	$J/\text{období}$
Q_i	Teplo od vnitřních tepelných zisků	$J/\text{období}$
R_{se}	Odpor při přestupu tepla na venkovní straně stavebního prvku	m^2K/W
g	Energetická propustnost stavebního prvku	-
F_{sh}	Korekční činitel stínění	-
A_f	Podlahová plocha (energetická vztažná plocha)	m^2
Φ_i	Vnitřní tepelné zisky	W
Φ_s	Solární tepelné zisky	W

Indexy spodní

s	Solární
Gh	Globální, horizontální
Gt	Globální, orientovaný a skloněný
w	Průsvitné stavební prvky (okna)
op	Neprůsvitné stavební prvky

1. Úvod

Jednou z funkcí obálky budovy může být zajištění přiměřeného množství solárních tepelných zisků prostupujících dovnitř budovy. Solární tepelné zisky přispívají v budovách v chladné části roku ke snižování potřeby tepla na vytápění. V teplejší části roku ale naopak mohou přispívat k přehřívání budov. Se zvyšující se tepelně izolační kvalitou obálky budovy mají solární zisky v tepelné bilanci budovy větší podíl, než tomu bylo v minulosti.

Do doby nedávno minulé teploty uvnitř budov systematicky nepřesahovaly horní mez komfortního pásma, a tak přehřívání budov nebylo vnímáno jako problém. Nově stavěné budovy jsou lehčí a s vyšším podílem oken v obálce než bývalo obvyklé v minulosti, s mnohem lepší tepelně izolační kvalitou a vzduchotěsností obálky a s vyšší úrovní vnitřních tepelných zisků, zejména od elektrických spotřebičů. Navíc dochází k postupné změně globálních klimatických podmínek, resp. lokální klimatické podmínky mohou být ovlivňovány vlivem rozsáhlých zastavěných oblastí, malého množství zeleně a velkého podílu asfaltu a betonu v krajině. Uvedené důvody zapříčiňují, že přehřívání budov nastává mnohem častěji, než tomu bylo dříve [1].

Za daných klimatických podmínek je tepelná bilance jakékoliv obytné budovy ovlivněna obtížně rozdělitelným pětiúhelníkem, jehož vrcholy představují tepelně izolační kvalitu obálky, tepelný tok větráním, solární tepelné zisky, tepelně akumulační schopnosti obálky a vnitřních stavebních prvků, a úroveň vnitřních tepelných zisků. Podíly jednotlivých složek tepelné bilance budovy se v klimatických podmínkách ČR zásadně liší v teplé a chladné části roku. Například solární tepelné zisky, tepelný tok větráním a změna zásoby tepla v hmotných vrstvách obálky budovy a vnitřních stavebních prvcích jsou rozhodující tepelné toky během teplé části roku, ale v chladné části roku nejsou hlavními složkami tepelné bilance.

Cílem tohoto příspěvku je definovat agregovaný parametr vyjadřující kvalitu obálky budovy z hlediska její schopnosti propouštět solární tepelné zisky do interiéru. Takový parametr se v příspěvku nazývá plocha solární apertury obálky budovy. V příspěvku bude provedeno teoretické odvození parametru. Na případové studii modelové budovy byl představen typický časový průběh plochy solární apertury. V navazující části budou odvozeny přiměřené hodnoty plochy solární apertury obálky kritické místnosti vedoucí k omezení rizika přehřívání.

2. Plocha solární apertury obálky budovy

Odvození

Stavebními prvky mohou být transparentní, ale i neprůsvitná část obálky budovy. Pro jednoduchost v odvození předpokládáme pouze dva stavební prvky.

Solární tepelný zisk přes stavební prvek 1 za časové období lze vyjádřit jako:

$$Q_{s1} = A_{col,1} H_{Gt,1} \quad [J/období] \quad (1)$$

kde H_{Gt} [J/m^2] je dávka globálního solárního ozáření plochy stavebního prvku o dané orientaci a sklonu. Obdobně můžeme vyjádřit solární tepelný zisk přes stavební prvek 2:

$$Q_{s2} = A_{col,2} H_{Gt,2} \quad [J/období] \quad (2)$$

Účinné sběrné plochy $A_{col,1}$, $A_{col,2}$ [m^2] jednotlivých stavebních prvků jsou vypočteny z celkových ploch stavebních prvků A_1 , A_2 [m^2] jako:

$$A_{col,1} = F_{sh1} g_1 A_1 \quad \text{resp.} \quad A_{col,2} = F_{sh2} g_2 A_2 \quad [m^2] \quad (3)$$

Celkové plochy stavebních prvků A_1, A_2 jsou tedy snižovány energetickou propustností stavebního prvku g a činitelem stínění F_{sh} , který zde souhrnně vyjadřuje veškeré možné stínící vlivy (např. horizont, markýza, svislé žebro, žaluzie, rám okna, atp.).

Celkový solární tepelný zisk přes oba stavební prvky je:

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} \quad [J/období] \quad (4)$$

Celkový solární tepelný zisk do budovy byl v příspěvku [2] vyjádřen jako součin vodorovné účinné sběrné plochy a dávky ozáření na vodorovnou rovinu:

$$Q_s = A_s H_{Gh} \quad [J/období] \quad (5)$$

kde H_{Gh} [$J/(m^2 \text{období})$] je dávka ozáření na vodorovnou rovinu za dané období a veličina A_s [m^2] byla nazývána jako plocha solární apertury obálky budovy.

Po dosažení rovnic (1), (2) do rovnice (4), a posléze rovnice (4) do rovnice (5) dostaneme vztah:

$$A_s = A_{col,1} \frac{H_{Gt,1}}{H_{Gh}} + A_{col,2} \frac{H_{Gt,2}}{H_{Gh}} \quad [m^2] \quad (6)$$

Celková plocha solární apertury obou stavebních prvků je tedy vytvořena z účinných sběrných ploch jednotlivých stavebních prvků navážením podle poměrů dávek globálního solárního ozáření. Účinné sběrné plochy $A_{col,1}$, $A_{col,2}$ stavebních prvků jsou nahrazeny jedinou vodorovnou účinnou sběrnou plochou A_s . Jedná se o horizontální plochu, která v průběhu roku (ale i dne) mění svoji velikost.

Obecně pro obálku budovy s n průsvitnými stavebními prvky, a m neprůsvitnými stavebními prvky, máme:

$$A_s = A_{s,w} + A_{s,op} = \sum_{i=1}^n A_{col,i} \frac{H_{Gt,i}}{H_{Gh}} + \sum_{j=1}^m A_{col,j} \frac{H_{Gt,j}}{H_{Gh}} \quad [m^2] \quad (7)$$

kde $A_{s,w}$ [m^2] je plocha solární apertury průsvitných prvků obvodového pláště a $A_{s,op}$ [m^2] je plocha solární apertury neprůsvitných prvků obvodového pláště.

Vliv neprůsvitných prvků obálky budovy

Solární tepelný zisk přes neprůsvitný nestíněný stavební prvek za delší časové období (například jeden měsíc) lze vyjádřit jako:

$$Q_{s,op} = \alpha_s R_{se} U A H_{Gt} \quad [J/\text{období}] \quad (8)$$

kde α_s [-] je pohltivost venkovního povrchu stavebního prvku pro solární záření, R_{se} [m^2K/W] je celkový odpor při přestupu tepla na venkovní straně stavebního prvku, U [$W/(m^2K)$] je součinitel prostupu tepla stavebního prvku, A [m^2] je plocha stavebního prvku a H_{Gt} [$J/(m^2 \text{období})$] je dávka globálního solárního ozáření na totožně orientovanou a skloněnou rovinu jako je rovina stavebního prvku. Po dosažení obvyklých hodnot pohltivosti (světlé barvy 0,3), odporu při přestupu ($0,04 m^2K/W$) a součinitele prostupu tepla ($< 0,30 W/(m^2K)$) je zřejmé, že solární tepelné zisky přes dobře tepelně izolované neprůsvitné stavební prvky jsou velmi často v porovnání se solárními tepelnými zisky přes transparentní prvky obálky zanedbatelné, a tedy u dnešních budov přibližně platí:

$$A_s \approx A_{s,w} \quad [m^2] \quad (9)$$

Interpretace veličiny

Plocha solární apertury je zobrazením množství solárních tepelných zisků Q_s do vodorovné sběrné plochy A_s . Známe-li množství solárních tepelných zisků za nějaké období Q_s , je tedy možné plochu solární apertury A_s dopočítat i jako:

$$A_s = \frac{Q_s}{H_{Gh}} \quad [m^2] \quad (10)$$

Plocha solární apertury obálky budovy je ze své definice svázaná nejen s vlastnostmi obálky budovy, ale i s klimatickými údaji (poměry ozáření v rovnici (7)). Ozáření vodorovné plochy je údaj nezávislý na budově a je měřitelný či dostupný z nejbližší klimatické stanice.

Vypočtená hodnota plochy solární apertury podle vzorce (10) představuje průměrnou hodnotu za zvolené časové období. Plocha solární apertury může charakterizovat celou budovu anebo také vhodně zvolenou menší prostorovou jednotku z budovy (prostor s podobným teplotním režimem). Příkladem mohou být kanceláře přiléhající k jedné z fasád kancelářské budovy (osluněná a neosluněná strana) či vybraná kritická místnost pro posouzení letní tepelné stability.

Aby bylo možné porovnávat budovy mezi sebou, může být výhodné plochu solární apertury vztahovat k vhodné geometrické charakteristice budovy, např. k velikosti podlahové plochy jako podíl A_s/A_f [m^2/m^2], anebo k zastavěnému objemu budovy A_s/V [m^2/m^3].

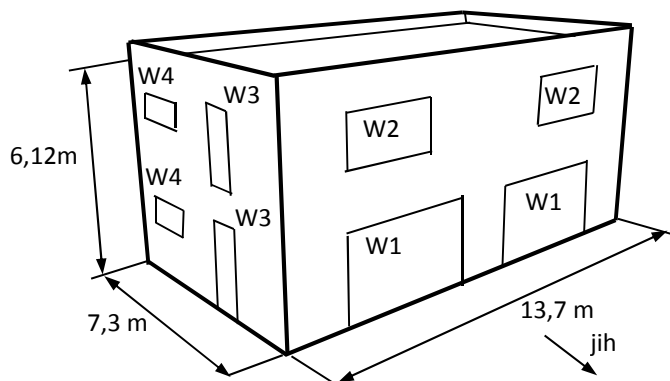
Pro zlepšení představy lze plochu solární apertury A_s převést na plochu ekvivalentního vodorovného zasklení $A_{g,ekv}$, přičemž je potřeba uměle definovat energetickou propustnost ekvivalentního zasklení. Praktická může být například hodnota $g = 0,5$, potom $A_{g,ekv} = 2A_s$.

3. Případová studie plochy solární apertury obálky modelového domu

Výpočet plochy solární apertury je ilustrovaný na příkladu. Jedná se o zjednodušený výpočet průměrných měsíčních hodnot.

Modelový rodinný dům

Modelový dům je rodinný dům běžné velikosti s jednoduchou geometrií (viz obr. 1). Základní geometrické parametry modelového domu jsou uvedeny v tab. 1. Celkové plochy oken a dílčí činitele prosklení v jednotlivých fasádách jsou uvedeny v tab. 2.



Obrázek 1: Modelový rodinný dům – axonometrie

Tabulka 1: Modelový rodinný dům – základní geometrické vlastnosti

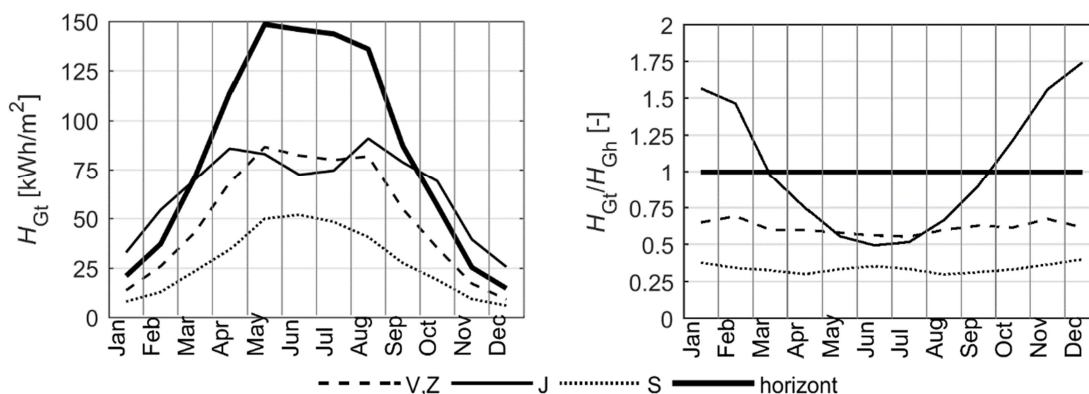
Zastavěná plocha	100 m ²	
Objem budovy	612 m ³	
Ochlazovaná plocha obálky	457 m ²	
Celková plocha fasády	257 m ²	
Celková plocha oken	55,2 m ²	
Objemový faktor tvaru	0,75 m ² /m ³	
Podlahová plocha (z celk. venkovních rozměrů)	200 m ²	
Rozměry oken	W1	4,15 m × 2,4 m
	W2	2,8 m × 1,5 m
	W3	1,0 m × 2,4 m
	W4	1,8 m × 0,8 m

Tabulka 2: Modelový rodinný dům - počty a plochy oken v jednotlivých fasádách

Orientace fasády	Počet oken	Celková pohledová plocha oken [m ²]	Dílčí činitel prosklení [-]	Celkový činitel prosklení fasády [-]
Východ	2 × W3, 2 × W4	7,68	0,17	0,21
Jih	2 × W1, 2 × W2	28,32	0,34	
Západ	2 × W3, 2 × W4	7,68	0,17	
Sever	8 × W4	11,52	0,14	

Poměry dávek ozáření

Měsíční hodnoty poměrů dávek ozáření H_{Gt}/H_{Gh} jsou pro základní orientace svislých ploch zobrazeny na obr. 2, vpravo. Poměry ozáření jsou váhami v rovnici (7). Hodnoty poměrů ovlivňují časovou proměnlivost plochy solární apertury.



Obrázek 2: Měsíční hodnoty dávek ozáření H_{Gt} (vlevo) a poměrů dávek ozáření H_{Gt}/H_{Gh} (vpravo)

V zimním období je hodnota poměru ozáření pro jižní orientaci fasády výrazně vyšší než jedna, zatímco v letním období klesá až k hodnotě 0,5. Poměr dávek ozáření má u jižně orientované svislé plochy výrazný sezónní charakter. U západní a východní orientace fasády je v porovnání s průběhem pro jižní fasádu průběh poměrů dávek ozáření prohnutý nevýrazně a hodnoty se pohybují v rozmezí 0,55 až 0,70. V případě severní orientace je průběh také téměř konstantní, jen hodnota poměru dávek ozáření je ještě o něco nižší než u západní či východní strany, přibližně 0,3. Poměry dávek ozáření mohou pravděpodobně vykazovat malou meziroční proměnlivost.

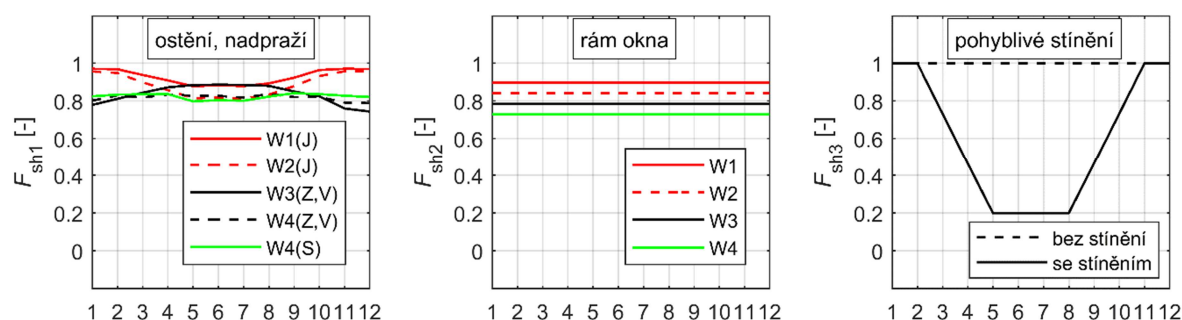
Korekční činitelé stínění

Značné obtíže v praxi představuje odhad či výpočet korekčních činitelů stínění. Stínění v modelovém domě nastává vlivem přesahu ostění a nadpraží a vlivem samotného rámu okna. Jiné pevné stínící překážky nejsou v modelovém domě přítomny. Pokud je modelový dům vybaven systémem venkovního stínění, promítne se takové stínění do korekčního činitele také. Celkový korekční činitel stínění okna byl vypočten jako:

$$F_{sh} = F_{sh1} F_{sh2} F_{sh3} \quad [-] \quad (11)$$

kde F_{sh1} je korekční činitel stínění vlivem zapuštění roviny skla od roviny fasády (stínící vliv ostění a nadpraží), F_{sh2} korekční činitel stínění vlivem rámu okna a F_{sh3} je korekční činitel stínění pohyblivého systému stínění.

Měsíční průměrné hodnoty korekčních činitelů stínění vlivem vodorovného přesahu ostění a nadpraží byly pro jednotlivá okna vypočteny podrobným numerickým modelem [4] s klimatickými údaji pro Prahu Libuš [5]. V numerickém modelu se předpokládalo, že rovina zasklení je zapuštěna 20 cm od venkovní roviny fasády, rám je předsazený o 1,5 cm před rovinou zasklení a pohledová šířka rámu okna je 8 cm. Časové průběhy korekčních činitelů stínění jsou zobrazeny na obr. 3.

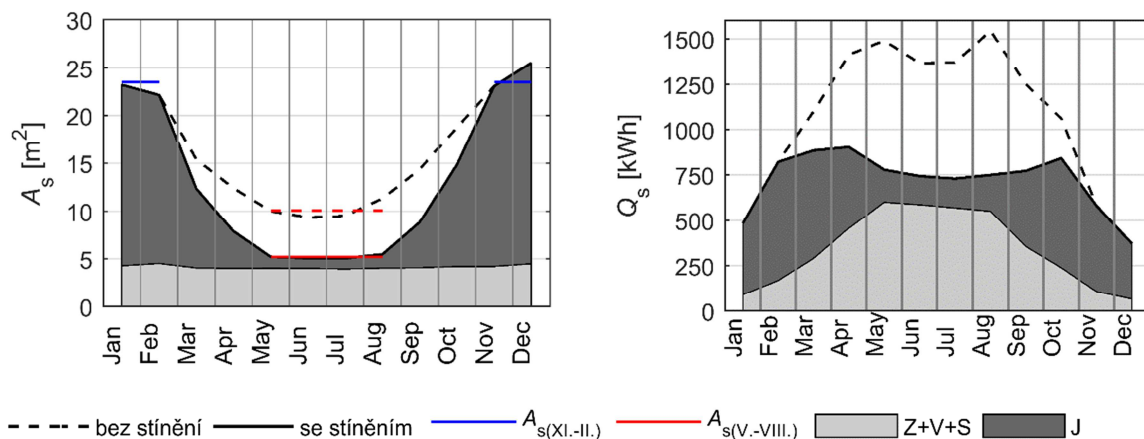


Obrázek 3: Průběh průměrných měsíčních hodnot korekčních činitelů stínění (vlevo – ostění a nadpraží, uprostřed – rám okna, vpravo – systém pohyblivého venkovního stínění (platí jen pro jižní fasádu))

Plocha solární apertury

K výpočtu plochy solární apertury obálky modelového domu A_s se používá vzorec (7). Vypočtené časové průběhy plochy solární apertury, dopadajícího solární záření na horizontální plochu H_{Gh} a solárních tepelných zisků Q_s jsou zobrazeny na Obr. 4. Ve výpočtu se předpokládalo, že zasklení má celkovou normálovou

propustnost pro solární energii rovnou 0,5. Jsou zobrazeny plochy solární apertury pro dvě varianty – bez pohyblivého stínění (stíní jen rám okna, nadpraží a ostění), a s pohyblivým stíněním (stíní jen okna na jižně orientované fasádě).



Obrázek 4: Průběh plochy solární apertury nestíněného modelového rodinného domu (vlevo) a solárních tepelných zisků (vpravo)

Plocha solární apertury obálky budovy zpravidla není konstantní hodnotou v čase. V případě modelového rodinného domu vykazuje plocha solární apertury výrazné sezónní kolísání (viz obr. 4, vlevo). Dominantní vliv na sezónní proměnlivost plochy solární apertury mají okna orientovaná na J (resp. JV a JZ, pokud jsou přítomna), u kterých jsou hodnoty poměrů dávek ozáření H_{Gt}/H_{Gh} v zimních měsících výrazně vyšší než jedna. Pokud by okna s těmito orientacemi vůbec nebyla zastoupena, byla by hodnota plochy solární apertury přibližně konstantní po celý rok (viz podíl označený jako Z+V+S).

Časový průběh plochy solární apertury během chladné (listopad–únor) resp. i teplé (květen–srpen) části roku je přibližně konstantní (viz obr. 4, vlevo). Pro zjednodušený popis sezónní proměnlivosti plochy solární apertury proto s jistou mírou přibližnosti postačují dvě průměrné hodnoty. V dalším textu se používají průměrná hodnota plochy solární apertury za období listopad až únor (označeno jako $A_{s(XI.-II.)}$) a průměrná hodnota plochy solární apertury za období květen až srpen (označeno jako $A_{s(V.-VIII.)}$). Obě dvě průměrné hodnoty jsou taktéž vyznačeny na obr. 4, vlevo.

I jen malé snížení plochy solární apertury má v teplejší části roku výrazný vliv na redukci solárních tepelných zisků. Zvýšení plochy solární apertury v chladné části roku naopak přinese jen malé navýšení solárních tepelných zisků. Důvodem nestejného vlivu změny plochy solární apertury na hodnotu solárních tepelných zisků je sezónní charakter množství dopadající solární energie (viz obr. 2, vlevo, rozdíl mezi 25 kWh/m² pro leden a 150 kWh/m² pro červen).

Co nejvyšší solární tepelné zisky v zimních měsících přispějí ke snížení potřeby tepla na vytápění budovy. Co nejnižší solární tepelné zisky v letních měsících naopak přispějí ke snížení potřeby tepla na chlazení či snížení rizika přehřívání budov. Ideální sezónní profil plochy solární apertury tedy je podobný funkci kosinus, s co nejvyššími průměrnými hodnotami za období listopad – únor, resp. s co nejnižšími průměrnými hodnotami za období květen – září. Takový tvar se snaží kompenzovat sezónní charakter průběhu dopadajícího solárního záření a tedy obrátit trend v množství solárních tepelných zisků v průběhu roku.

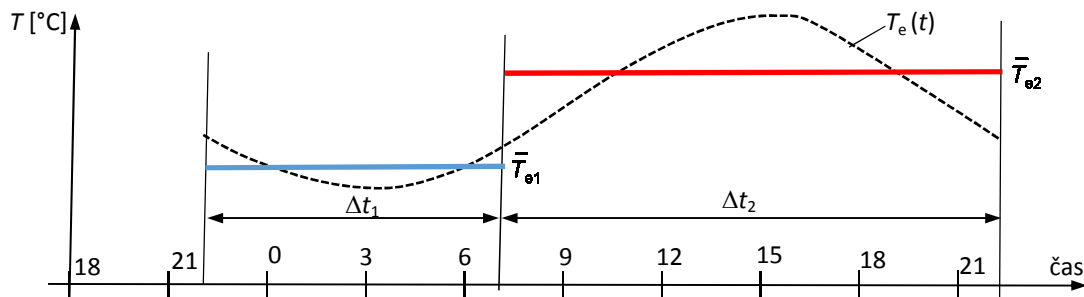
V dalším textu se používá normalizace absolutní hodnoty plochy solární apertury vzhledem k objemu budovy. Taková veličina se nazývá měrná plocha solární apertury A_s/V . V případě modelového domu nabývá průměrná hodnota A_s/V za období V. – VIII. hodnot 0,0165 m²/m³ (dům bez pohyblivého stínění), resp. 0,0086 m²/m³ (s pohyblivým stíněním oken na jižně orientované fasádě). Pokud by pohyblivé stínění bylo použito na všech oknech modelové budovy, měrná plocha solární apertury dosáhne hodnoty 0,0033 m²/m³.

Představený zjednodušený výpočet ve skutečnosti jen odhaduje skutečnou plochu solární apertury. Mimo jiné předpokládá, že systém venkovního stínění redukuje v teplém období roku solární tepelné zisky na 20 % (viz obr. 3, vpravo). Předpokládá se to bez jakékoliv vazby na aktuální teplotu uvnitř budovy, chování uživatele, či algoritmus automatického ovládání pohyblivého systému stínění.

4. Přiměřený solární tepelný zisk pro snížení rizika přehřívání kritické místnosti

Obecně je potřeba zajistit, aby množství solárních tepelných zisků bylo přiměřené dané situaci, tj. tepelným vlastnostem obálky budovy a vnitřních stavebních prvků, provozu uvnitř budovy a podmínkám kritického dne a požadované úrovni maximální vnitřní teploty. Otázkou zůstává, jaké hodnoty měrné plochy solární apertury, resp. měrných solárních tepelných zisků zajistí nepřekročení stanovené maximální hodnoty teploty uvnitř kritické místnosti.

V této části je na základě jednoduchého modelu odvozena závislost přiměřených měrných solárních tepelných zisků, resp. přiměřené měrné plochy solární apertury, na parametrech obálky budovy a okolního prostředí. Cílem analýzy není co nejpřesnější popis reality. Chceme pouze získat první vzhled do problému. Zjednodušeně se proto v modelu předpokládá ustálený stav. V odvození se vychází z jednoduché představy opakujícího se kritického dne, který je rozdělen na dvě části – část dne se zvýšeným větráním, obvykle noční hodiny (index 1) a část dne se základním větráním, obvykle přes den (index 2), ve kterém zároveň působí solární tepelné zisky. Časová období trvají Δt_1 a Δt_2 a přísluší jim průměrné venkovní teploty \bar{T}_{e1} a \bar{T}_{e2} (viz obr. 5).



Obrázek 5: Kritický den pro přehřívání místnosti rozdělený na dvě části

Tepelná bilance kritické místnosti za předpokladu ustáleného teplotního stavu je:

$$Q_s + Q_i - Q_T - Q_v = 0 \quad [\text{Wh/den}] \quad (12)$$

kde Q_s je teplo od solárních tepelných zisků, Q_i je teplo od vnitřních tepelných zisků, Q_T je teplo procházejícího přes obálku budovy a Q_v je teplo přenesené větráním.

Množství tepla přeneseného větráním za jeden den lze zjednodušeně rozepsat jako:

$$Q_v = Q_{v1} + Q_{v2} \quad (13)$$

Po rozepsání obou složek máme:

$$Q_v = \bar{\Phi}_v \Delta t = H_{v1} (\bar{T}_{i1} - \bar{T}_{e1}) \Delta t_1 + H_{v2} (\bar{T}_{i2} - \bar{T}_{e2}) \Delta t_2 \quad [\text{Wh/den}] \quad (14)$$

kde $\bar{\Phi}_v$ [W] je denní průměrná hodnota tepelného toku větráním (Δt se rovná 24 hodin). Vodorovný pruh nad veličinami zdůrazňuje, že se jedná o průměrnou hodnotu veličiny v časovém období.

Protože vnitřní teplota T_{i2} a venkovní teplota T_{e2} typicky nejsou během denní doby kritického dne daleko od sebe, a zároveň v obytných budovách je přítomnost obyvatel uvnitř budovy spíše soustředěna do nočních hodin, a tedy intenzita větrání během dne může být nízká, je možné za těchto předpokladů zjednodušeně považovat Q_{v2} za nulové. Předchozí rovnice se potom redukuje do následujícího tvaru:

$$\bar{\Phi}_v = H_{v1} (\bar{T}_{i1} - \bar{T}_{e1}) \frac{\Delta t_1}{\Delta t} \quad [\text{W}] \quad (15)$$

Pokles teploty uvnitř budovy během období se zvýšeným větráním závisí na hodnotě časové konstanty budovy během období se zvýšeným větráním (období 1). Protože nechceme nadhodnotit vliv nočního větrání v rovnici, budeme za průměrnou teplotu \bar{T}_{i1} zjednodušeně považovat denní průměrnou venkovní teplotu \bar{T}_e . Tepelná bilance zahrnující vliv větrání i vnitřních tepelných zisků je posléze zapsána jako:

$$\bar{\Phi}_s + \bar{\Phi}_i = U_{em} A (\bar{T}_i - \bar{T}_e) + H_{v1} (\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}) \frac{\Delta t_1}{\Delta t} \quad [\text{W}] \quad (16)$$

kde vnitřní tepelné zisky $\bar{\Phi}_i$ a solární tepelné zisky $\bar{\Phi}_s$ představují denní průměrné hodnoty tepelných toků. Pro průměrnou vnitřní teplotu po úpravě máme:

$$\bar{T}_i = \bar{T}_e + \frac{\bar{\Phi}_s}{U_{em}A} + \frac{\bar{\Phi}_i}{U_{em}A} - \frac{n_1 0,34 f_r V}{U_{em}A} (\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}) f_1 \quad (17)$$

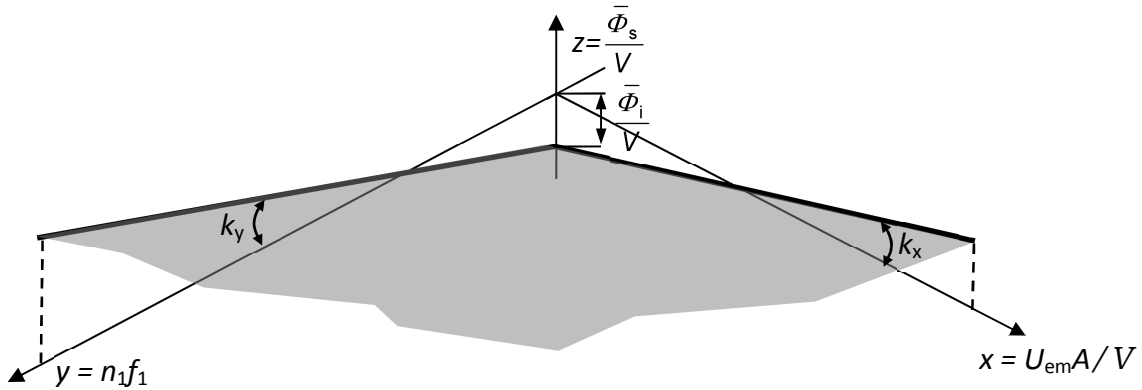
kde n_1 [1/h] je intenzita větrání během období zvýšeného větrání, f_r [-] je podíl objemu vzduchu v celkovém obestavěném objemu, $f_1 = \Delta t_1 / \Delta t$ [-] je časový podíl období se zvýšeným větráním (typicky např. 9/24).

Pokud průměrná vnitřní teplota nemá přesáhnout stanovenou maximální hodnotu $\bar{T}_i \leq \bar{T}_{i,max}$, potom můžeme vyjádřit denní průměrný měrný solární tepelný zisk vedoucí ke splnění předchozí podmínky:

$$\frac{\bar{\Phi}_s}{V} \leq U_{em} \frac{A}{V} (\bar{T}_{i,max} - \bar{T}_e) + n_1 f_1 0,34 f_r (\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}) - \frac{\bar{\Phi}_i}{V} \quad [W/m^3] \quad (18)$$

Vztah (18) dává vzhled na faktory ovlivňující přiměřený měrný solární tepelný zisk. Lze ho fyzikálně interpretovat tak, že k udržení stálé hodnoty denní průměrné vnitřní teploty musí být teplo od slunce a vnitřních zisků odvedeno přes obálku budovy a větráním. Výraz na pravé straně nerovnice (18) lze interpretovat geometricky jako skloněnou rovinu posunující se ve směru osy z dolů o vliv vnitřních tepelných zisků (viz obr. 6). Proměnné jsou parametry $x = U_{em}A/V$, $y = n_1 f_1$. Sklony vůči osám x a y jsou:

$$k_x = \bar{T}_{i,max} - \bar{T}_e \text{ resp. } k_y = 0,34 f_r (\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}) \quad (19)$$



Obrázek 6: Geometrická interpretace vztahu (18)

Přiměřená hodnota měrného solárního tepelného zisku závisí tepelně izolační kvalitě obálky kritické místnosti (U_{em}) a kompaktnosti objemu kritické místnosti (faktor tvaru A/V), na intenzitě zvýšeného větrání (parametr n_1) a časovém podílu období zvýšeného větrání (parametr f_1), úrovni vnitřních tepelných zisků, ale také na požadované hodnotě nejvyšší vnitřní teploty a teplotních podmínkách v exteriéru.

Za vztažnou jednotku je možné použít i podlahovou plochu, protože objem lze vyjádřit jako $V = A_f k_v$, kde A_f [m^2] je celková podlahová plocha stanovená z vnějších rozměrů, a k_v [m] je konstrukční výška.

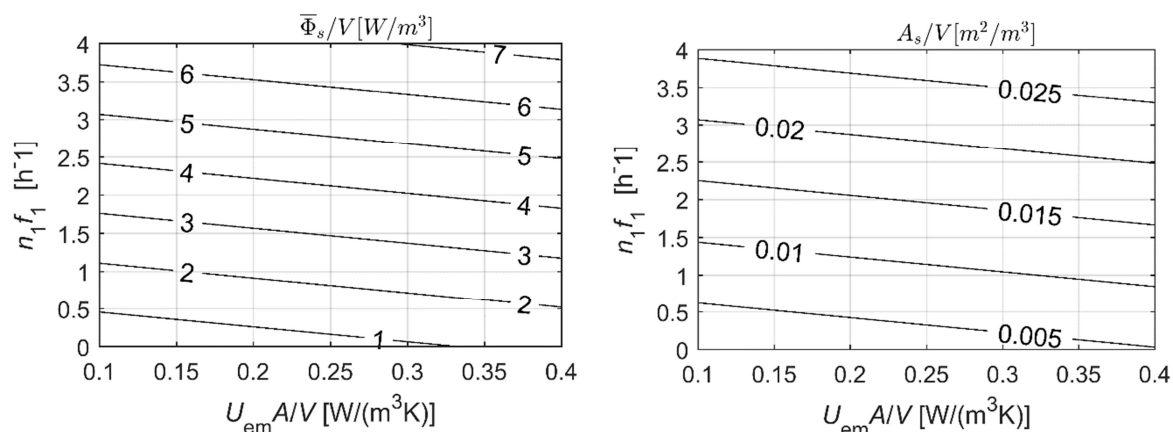
$$\frac{\bar{\Phi}_s}{A_f} \leq k_v \left(U_{em} \frac{A}{V} (\bar{T}_{i,max} - \bar{T}_e) + n_1 f_1 0,34 f_r (\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}) - \frac{\bar{\Phi}_i}{V} \right) \quad [W/m^2] \quad (20)$$

Vztahy (18) a (20) lze také vyjádřit alternativně ve formě měrné plochy solární apertury:

$$\frac{A_s}{V} \leq U_{em} \frac{A}{V} \frac{\bar{T}_{i,max} - \bar{T}_e}{\bar{G}_{Gh}} + n_1 f_1 0,34 f_r \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_{e1}}{\bar{G}_{Gh}} - \frac{\bar{\Phi}_i}{\bar{G}_{Gh}} \quad [m^2/m^3] \quad (21)$$

kde \bar{G}_{Gh} [W/m^2] je průměrné globální solární ozáření na vodorovnou rovinu během kritického dne (jedná se o denní průměrnou hodnotu při zahrnutí nočních hodnot s nulovým ozářením).

□ **Příklad:** Předpokládají se následující podmínky: $\bar{T}_{i,max} = 26$ °C, $\bar{T}_e = 23$ °C, $\bar{T}_{e1} = 18$ °C, $\Phi_i = 0$ W a $\Delta t_1 / \Delta t = 9/24$. Přiměřené hodnoty měrných solárních tepelných zisků, resp. měrných ploch solární apertury byly vypočteny ze vztahů (18) a (21). Hodnoty jsou vyneseny v grafech, viz obrázek 7. Pro přepočtení měrného solárního tepelného zisku na hodnoty měrné plochy solární apertury byla použita hodnota $\bar{G}_{Gh} = 250$ W/m^2 . Průměrná denní hodnota ozáření na vodorovnou rovinu odpovídá jasnému dni v blízkosti letního slunovratu.



Obrázek 7: Přiměřené hodnoty denního průměrného měrného solárního tepelného zisku a měrné plochy solární apertury odvozené ze statického modelu (za předpokladu nulových vnitřních tepelných zisků).

Z velikosti sklonů plochy vůči oběma osám je zřejmé, že přiměřený měrný solární tepelný zisk, resp. přiměřená hodnota měrné plochy solární apertury, je silněji ovlivněna intenzitou větrání. Tepelná charakteristika obálky budovy $U_{em}A/V$ není zásadním faktorem, i když nějaký vliv samozřejmě má. Průměrná hodnota měrné plochy solární apertury A_s/V za období V. – VIII. v případě modelového domu nabývala hodnoty $0,0086 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (varianta s pohyblivým stíněním oken na jižně orientované fasádě). Pokud by modelový dům například dosahoval $U_{em}A/V = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$, pro $A/V = 0,75 \text{ m}^2/\text{m}^3$ to odpovídá $U_{em} = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, lze odečíst, že intenzita větrání n_{1f_1} , s kterou je možné udržet požadovanou průměrnou vnitřní teplotu, má být nižší než $1,1 \text{ h}^{-1}$ (viz obrázek 7, vpravo). Potřebnou intenzitu větrání během nočního období n_1 dopočteme z $n_1 \times (9/24) = 1,1$. Potřebná intenzita větrání tedy přibližně dosahuje $n_1 \approx 2,7 \text{ h}^{-1}$.

Pokud by uvnitř kritické místnosti působil denní průměrný vnitřní tepelný zisk $0,5 \text{ W}/\text{m}^3$ (tj. cca $1,5 \text{ W}/\text{m}^2$), znamenalo by to posun plochy v grafu o $0,002 \text{ m}^2/\text{m}^3$ níže. Potřebná intenzita větrání by se potom zvýšila přibližně na hodnotu $n_1 \approx 3,8 \text{ h}^{-1}$. Zde je vhodné podotknout, že hodnoty intenzity větrání vyšší než 5 h^{-1} mohou být v praxi obtížně dosažitelné. I předpoklad délky období zvýšeného větrání (v příkladu se předpokládá 9 h) může být v některých případech nadhodnocen, např. kvůli hlukovému zatížení z okolí budovy.

5. Diskuze

Základní otázkou je, zda je vyjádření solárních tepelných zisků ve formě ekvivalentní vodorovné účinné sběrné plochy vlastně výhodné, resp. potřebné. Stejnou informaci totiž poskytují měrné solární tepelné zisky. Plocha solární apertury nicméně může explicitně vystupovat jako regresní parametr v lineárních vícenásobných regresních modelech spotřeby tepla na vytápění, např. v modelu, kdy je spotřeba tepla na vytápění modelována jako lineární kombinace příspěvků od venkovní teploty, solárního záření a rychlosti větru: spotřeba = $H \cdot T_{ae} - A_s H_{Gh} + K_a v_a + e$, kde H , A_s a K_a jsou regresní parametry a e je chyba regresního modelu. Znalost dosažitelných hodnot, resp. charakteru časového průběhu plochy solární apertury, by mohla pomoci zlepšit regresní model.

V navazující studii by bylo vhodné blíže teoreticky prozkoumat vlastnosti plochy solární apertury. Jednou ze základních otázek je závislost plochy solární apertury na klimatické lokalitě. Je potřeba ověřit, zda jsou poměry měsíčních dávek solárního ozáření H_{Gv}/H_{Gh} (viz rovnice (6)) podobné v různých lokalitách České republiky, resp. zda jsou měsíční poměry dávek ozáření také srovnatelné z roku na rok. Pokud by tomu tak bylo, lze poměry H_{Gv}/H_{Gh} pro Českou republiku smluvně zafixovat na průměrných hodnotách. Solární aperturu obálky budovy by tedy bylo možné v rámci prostoru České republiky považovat za výlučnou vlastnost obálky budovy. Toto by mělo praktický dopad při návrhu budov, protože ze smluvních hodnot poměrů měsíčních dávek ozáření by bylo možné solární aperturu vypočítat, a tedy i orientačně zkontrolovat její přiměřenou velikost, aniž by bylo potřeba znát číselné hodnoty dávek ozáření na jednotlivé fasády. Údaje o dávkách solárního záření jsou obvykle špatně dostupné.

Bylo by také vhodné provést analýzu dosažitelných hodnot a typických časových průběhů měrné plochy solární apertury pro různé varianty rozložení oken na fasádách modelových budov, resp. různé varianty pevného či pohyblivého stínění. Neprozkoumanou otázkou například je, zda lze dobře navrženými pevnými stínícími překážkami zajistit dostatečnou účinnost stínění, případně v jakých místech dispozice u větších bytových domů

či bytových celků se lze obejít bez venkovních žaluzií. V technické praxi jsou také obtížně dostupné hodnověrné hodnoty činitelů stínění pro typické konfigurace okenních otvorů a stínících překážek.

Doporučené hodnoty měrné plochy solární apertury, resp. měrných solárních tepelných zisků, viz vztah (18) a (21), byly odvozeny na základě jednoduchého statického modelu kritické místnosti. Vztahy proto nemohou přinést pohled na vliv tepelně akumuláční schopnosti obálky a vnitřních stavebních prvků na úroveň přiměřeného měrného solárního tepelného zisku, resp. přiměřené měrné plochy solární apertury. Navazující studie by se mohla, resp. měla, věnovat odvození přiměřených hodnot měrného solárního tepelného zisku, resp. měrné plochy solární apertury na základě analýzy vhodného dynamického modelu kritické místnosti. Lze předpokládat, že plocha na obr. 7 nebude ve skutečnosti rovná, a bude se nějakým způsobem prohýbat v závislosti na tepelné setrvačnosti budovy.

6. Závěr

Tento příspěvek se zabýval agregovaným tepelným parametrem obálky budovy, který charakterizuje kvalitu obálky budovy z hlediska její schopnosti propouštět solární tepelné zisky do interiéru budovy. Agregovaná tepelná charakteristika byla nazvána jako plocha solární apertury obálky budovy. Na případové studii modelové budovy byl představen typický časový průběh plochy solární apertury a byly představeny dvě průměrné hodnoty, které postačují k přibližnému popisu časové proměnlivosti plochy solární apertury během roku.

Analyticky byly odvozeny orientační přiměřené hodnoty měrné plochy solární apertury, které jsou potřeba pro snížení rizika přehřívání obytných budov. Přiměřené hodnoty byly vyjádřeny jako funkce tepelné charakteristiky obálky budovy, intenzity nočního větrání a průměrných vnitřních tepelných zisků. Na příkladu zvolených klimatických údajů charakterizujících kritický letní den byly pro názornost vyčísleny přiměřené hodnoty měrné plochy solární apertury. Jelikož použitý model využíval předpoklad ustáleného stavu, nevedla analýza ke zjištění závislosti přiměřených hodnot měrné plochy solární apertury na tepelné setrvačnosti obálky budovy a vnitřních stavebních prvků. Předpokládá se, že taková analýza bude provedena v budoucnu.

Literatura

- [1] LOMAS, J., K., PORRITT, S., M., Overheating in buildings: lessons from research, Building Research & Information, 45:1-2, 1-18, 2017, DOI: [10.1080/09613218.2017.1256136](https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1256136)
- [2] KOPECKÝ, P., SOJKOVÁ, K., Agregované tepelné charakteristiky budov Část 1.: motivace a odvození hlavních charakteristik, In: Vytápění, Větrání, instalace 02/2016.
- [3] KOPECKÝ, P., SOJKOVÁ, K., Analýza možných dopadů změny klimatických okrajových podmínek na obytné budovy v České republice, In: Vytápění, Větrání, instalace 01/2019.
- [4] STANĚK, K., numerický model stínění v prostředí MATLAB, nepublikováno.
- [5] Meteororm 7.0, www.meteotest.ch

Poděkování

Tento článek vznikl za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti.