



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

POSOUZENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI BUDOVY JAKO TEPELNÉHO SYSTÉMU

ASSESSMENT OF ENERGY PERFORMANCE OF THE BUILDING AS A THERMAL SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Konvičný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK,
CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|-------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|-----------------|--|
| Student | Václav Konvičný |
| Název | Posouzení energetické náročnosti budovy jako tepelného systému |
| Vedoucí práce | prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc. |
| Datum zadání | 30. 11. 2016 |
| Datum odevzdání | 26. 5. 2017 |

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Davies, Morris, G., Building Heat Transfer, John Wiley 2004

Halahyja, M. a kol., Stavebná tepelná technika. Tepelná ochrana budov, Jaga Bratislava 1998

ČSN 730540, Tepelná ochrana budov, UNMZ 2011

Firemní literatura ohledně tepelně-izolačních materiálů

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Energetická náročnost budov se v současné době posuzuje různými kritérii, jež jsou navázány jak na materiálovou koncepci stavby, tak na její geometrické uspořádání. Metodiky výpočtového odhadu spotřeby energie vychází z metodik, jež pracují s tepelně-izolační schopností tzv. obálky posuzované budovy.

Jak známo, že postupy hodnocení spotřeby energie ne zcela korespondují s reálnou spotřebou energie. Těsněji tomu odpovídá údaj ze simulačních výpočtů v rámci referenčního klimatického roku.

V této souvislosti provedte:

- i) rešerši poznatků ohledně fyzikálních pochodů tepelného šíření budovou,
- ii) popište fyzikální procesy související s tepelným šířením obálkou budov, zejména interakci s vnějšími klimatickými podmínkami,
- iii) specifikujte fyzikální jevy tepelného šíření stavebními materiály. Vymezte míru jejich projevu v reálných podmínkách staveb v klimatických podmínkách ČR,
- iv) na základě výpočetních odhadů porovnejte výsledky jednotlivých postupů hodnocení energetické náročnosti u vybraného stavebního objektu,
- v) vymezte očekávané trendy ve vývoji materiálových požadavků izolačních materiálů určených pro zabudování do stavby z hlediska jejich energetické náročnosti a posuďte vhodnost současných staviv pro naplnění perspektivních požadavků na stavby.

Při vypracování bakalářské práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; praktická část do 20 % rozsahu; celkový rozsah do 40 stran včetně tabulek a grafů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je posouzení energetické náročnosti budovy jako tepelného systému. V práci jsou popsány a vypracovány dokumenty, které jsou v současné době užívány ke stanovení energetické náročnosti budovy. Jedná se o průkaz energetické náročnosti budovy (PENB) a energetický štítek obálky budovy. (EŠOB). V práci jsou dále popsány stěžejní vlastnosti používaných materiálů pro zajištění tepelné pohody v budově.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energie, spotřeba energie, tepelný systém, tepelná izolace, tepelná akumulace, součinitel prostupu tepla, průkaz energetické náročnosti budovy (PENB), energetický štítek obálky budovy, nízkoenergetické domy.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with assessment of energy performance of the building as a particular heating system. Documents that are currently utilized for determining energy performance of a building are described and elaborated in the study. It is Energy Performance Certificate (PENB) and European Union Energy Label (EŠOB). Furthermore, crucial properties of the materials used for ensuring heating stability of the building are described in the study.

KEYWORDS

Energy, energy consumption, heating system, heating insulation, heating accumulation, coefficient of heat transmission, Energy Performance Certificate (PENB), European Union Energy Label, low-energy buildings

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Václav Konvičný *Posouzení energetické náročnosti budovy jako tepelného systému*.
Brno, 2017. 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí
práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Václav Konvičný
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a motivaci během bakalářského studia. Můj velký dík patří také vedoucímu této bakalářské práce, panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc., za odborné vedení, užitečné rady, věcné připomínky a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat svému příteli Vítovi Mikešovi za čas strávený při konzultacích.

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Způsoby šíření tepla | 11 |
| 2.1 Šíření tepla vedením (kondukcí) | 11 |
| 2.2 Šíření tepla prouděním (konvekci) | 13 |
| 2.2.1 Součinitel přestupu tepla při volném proudění..... | 14 |
| 2.3 Šíření tepla sáláním (radiací)..... | 15 |
| 2.3.1 Zákony sálání..... | 17 |
| 2.3.2 Výměna tepla sáláním | 18 |
| 3. Legislativa | 19 |
| 4. Šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy | 19 |
| 4.1 Výpočty pro energetický štítek obálky budovy..... | 19 |
| 4.1.1 stanovení obvodových konstrukcí | 19 |
| 4.1.2 Stanovení vnějších a vnitřních teplot..... | 20 |
| 4.1.3 Stanovení součinitele prostupu tepla | 21 |
| 4.1.4 Měrná ztráta prostupem tepla | 23 |
| 4.1.5 Zařazování do klasifikačních tříd | 25 |
| 4.2 Výpočty pro simulační program | 26 |
| 4.2.1 Budova jako systém místností | 26 |
| 4.2.2 Šíření tepla rovinnou stěnou (případně s vnitřním tepelným zdrojem)..... | 28 |
| 4.2.3 Rovnice tepelné rovnováhy – bilanční složky ve smyslu Kirchhoffovy rovnice | 31 |
| 5. Tepelná akumulace stavebních materiálů..... | 34 |
| 5.1 Plošná tepelná kapacita..... | 34 |
| 5.2 Relaxační doba | 35 |
| 5.3 Tepelná jímavost | 36 |
| 6. Očekávaný vývoj budov z hlediska energetické náročnosti..... | 38 |
| 6.1 Domy s nízkou spotřebou energie | 38 |

| | |
|--|----|
| 6.1.1 Nízkoenergetické domy | 39 |
| 6.1.2 Pasivní domy | 39 |
| 6.1.3 Nulové domy | 40 |
| 6.2 Konstrukční materiály nosných obvodových konstrukcí | 40 |
| 6.2.1 Konstrukční systém z cihelného zdiva | 40 |
| 6.2.2 Konstrukční systém z pórobetonového zdiva..... | 41 |
| 6.2.3 Konstrukční systémy z jiných materiálů | 41 |
| 6.3 Izolační materiály | 42 |
| 6.3.1 Expandovaný polystyren - bílý..... | 42 |
| 6.3.2 Expandovaný polystyren – grafitový..... | 42 |
| 6.3.3 Extrudovaný polystyren..... | 43 |
| 6.3.4. Vakuová izolace | 44 |
| 7. Experimentální část | 45 |
| 7.1 Popis vybraného objektu | 45 |
| 7.2 Energetický štítek obálky budovy | 47 |
| 7.3 Průkaz energetické náročnosti budovy | 50 |
| 7.4 Výstupy ze simulačního programu pro referenční rok v podmínkách klimatu ČR... 54 | |
| 7.5 Vyhodnocení..... | 55 |
| 8. Závěr..... | 56 |
| 9. Použité podklady a literatura | 57 |
| 10. Seznam tabulek..... | 58 |
| 11. Seznam obrázků..... | 59 |
| 12. Seznam symbolů..... | 60 |
| 13. Seznam zkratk..... | 62 |

1. Úvod

Energetická náročnost budov se v současné době stává stále častěji skloňovaným pojmem, a to hlavně díky neustále rostoucím cenám energií. Budovy je tedy nutno posuzovat nejen z ohledu uživatelského komfortu a architektonické výjimečnosti, ale i s ohledem na spotřebu energie. Energetická náročnost budovy nezahrnuje pouze vytápění, sledují se také další stanoviska, jako například ohřev vody, větrání, klimatizace nebo pohon podpůrných systémů jako tepelná čerpadla či klimatizace.

V České republice se spotřeba energií spojených s budovami podílí na spotřebě primárních energetických zdrojů více než třetinou, a proto z důvodů ekologických a ekonomických vyšla Evropská směrnice 2002/91/ES, která se postupně zavádí do všech zemí Evropské unie.

Z těchto důvodů byla v ČR přijata vyhláška 148/2007 o energetické náročnosti budovy ze zákona č. 406/2000 Sb., která definuje průkaz energetické náročnosti budovy (PENB). Průkaz energetické náročnosti budovy počítá se spotřebami energie na vytápění, přípravu teplé vody, úpravu vnitřního klimatu chlazením, osvětlení a chlazení. Energetická náročnost se poté stanoví potřebným množstvím dodané energie a zařadí budovu do jedné se sedmi energetických tříd z hlediska roční spotřeby energie.

Musíme odlišovat průkaz energetické náročnosti od energetického štítku obálky budovy (EŠOB), který je definován normou ČSN 73 0540-2:2011 – Tepelná ochrana budov. Energetický štítek posuzuje budovu pomocí tepelně izolačních schopností obálky budovy. Výstupem energetického štítku obálky budovy je průměrný součinitel prostupu tepla, podle kterého se poté zařazuje hodnocená budova do sedmi tříd. Tento dokument se zpracovává v rámci Energetického auditu. Průkaz obsahuje také část, která navrhuje konkrétní opatření pro dosažení úspornějšího stavu a vyčísluje i návratnost investic.

Postupy hodnocení spotřeby energie nemusí pokaždé souhlasit s reálnou spotřebou energie. Proto lze pro přesnější odhad použít simulační výpočty v rámci referenčního klimatického roku. Díky těmto simulačním výpočtům získáme lepší představu o potřebě energie na vytápění, průběžích teplot vnitřního vzduchu v místnostech, povrchových teplotách i tepelných výkonech.

2. Způsoby šíření tepla

Teplo se šíří v jakémkoliv prostředí, pokud jsou na různých místech tohoto prostředí rozdílné teploty, přičemž z míst, kde je teplota vyšší, přechází teplo do prostor s nižší teplotou. Přenos tepla zahrnuje jevy, při kterých systém teplo odevzdává nebo přijímá. Podle toho v jakém prostředí se tento pohyb tepelné energie uskutečňuje, rozeznáváme šíření tepla

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací).

V praxi se šíření tepla nerealizuje jen jedním z těchto způsobů, ale jejich různou kombinací [3].

2.1 Šíření tepla vedením (kondukcí)

Vedení tepla probíhá v pevných látkách, ale také v plynech a kapalinách, pokud jsou v klidu. Vedení tepla vzniká v důsledku výměny energie mezi mikročásticemi, což mohou být například molekuly látky. Vedení tepla se uplatňuje zejména v pevných vrstvách stavebních konstrukcí a podílí se i na celkovém přenosu tepla ve vzduchových vrstvách ve stavebních konstrukcích a mezi skly oken. Ty mohou být vyplněny i jiným plynem než vzduchem. Vyskytuje se i v mezních vrstvách na povrchu stavebních konstrukcí, vytvářených kolem nich proudícím vzduchem.

Pro vedení tepla platí Fourierův zákon. Ten vyjadřuje úměrnost mezi hustotou tepelného toku vedením q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a teplotním gradientem (dt/dn) [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$]. Má tvar ve skalární formě [1]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn} = -\lambda \cdot \text{grad } t,$$

kde: λ tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

t teplota [$^{\circ}\text{C}$],

n normála [m].

Tepelná vodivost charakterizuje schopnost látek a materiálů šířit teplo vedením. Čím je hodnota tepelné vodivosti větší, tím je materiál vodivější a tím větší tok tepla může proudit materiálem, tedy stavební konstrukcí. Podle hodnoty tepelné vodivosti můžeme materiály

rozdělit na dobré a špatné vodiče tepla. Stavební a tepelně izolační materiály se označují jako špatné vodiče tepla, protože jejich hodnota tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí 0,024 do 5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Mezi dobré vodiče tepla patří kovy. Například hliník má hodnotu $\lambda = 204 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tepelná vodivost se nemůže označovat jako konstanta, její hodnota je totiž závislá na různých parametrech. U tepelně izolačních a stavebních materiálů to jsou zejména hustota, objemová hmotnost, pórovitost, směr tepelného toku, jsou-li materiály neizotropní, teploty a vlhkost. Tyto vyjmenované parametry se vyšetřují experimentálně. Pro normové nebo jiné závazné hodnocení a navrhování stavebních konstrukcí z hlediska tepelné techniky se používají výpočtové hodnoty. Ty zahrnují všechny vlivy, které působí na stavební konstrukce před i po jejich výrobě, zabudování do stavby a při používání stavby. V Tab. 1 jsou uvedeny tepelné vodivosti některých materiálů.

Tab. 1: Přehled výpočtových hodnot tepelné vodivosti některých materiálů λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], (ρ – objemová hmotnost, e – hodnoty platné pro vnější konstrukce, i – pro vnitřní konstrukce) [2]

| Materiál | ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | |
|-------------------------------|---|--|-------|
| | | e | i |
| Pěnový polystyren | 15 až 40 | 0,043 | 0,043 |
| Dřevotřískové desky | 500 | 0,085 | 0,085 |
| Sádrokarton | 750 | 0,16 | 0,14 |
| Sklo | 2600 | 0,76 | 0,76 |
| Železo | 7850 | 58 | 58 |
| Železobeton | 2400 | 1,57 | 1,57 |
| Beton prostý | 2200 | 1,28 | 1,16 |
| Beton z keramzitu | 1000 | 0,41 | 0,36 |
| Plynosilikát | 500 | 0,19 | 0,19 |
| Zdivo z plných pálených cihel | 1800 | 0,86 | 0,77 |
| Malta vápenná | 1600 | 0,87 | 0,7 |
| Omítka perlitová | 440 | 0,13 | 0,11 |

2.2 Šíření tepla prouděním (konvekci)

Proudění tepla se vyznačuje makropohybem prostředí. Jde obvykle o proudění vzduchu kolem stavebních konstrukcí. Když proudí vzduch kolem konstrukce, jejíž povrchová teplota je odlišná od teploty vzduchu, dochází mezi vzduchem a povrchem k výměně tepla. Tato výměna tepla se označuje jako šíření tepla prouděním a je popsána Newtonovým vztahem:

$$q_k = \alpha_k \cdot (t_1 - t_2) [4],$$

kde: q_k hustota tepelného toku prouděním [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

α_k součinitel přestupu tepla při proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

t_1, t_2 teplota vzduchu a povrchu konstrukce [$^{\circ}\text{C}$].

Součinitel přestupu tepla charakterizuje výměnu tepla při proudění vzduchu kolem pevného nebo kapalného povrchu, tudíž kolem stavební konstrukce. Čím je větší hodnota součinitele přestupu tepla, tím je větší tepelný tok proudící ze vzduchu do konstrukce, nebo to může být i naopak. Pro stanovení součinitele přestupu tepla při proudění má zásadní vliv druh proudění. Proudění se rozlišuje na volné a nucené. Nucené proudění vzniká v důsledku působení tlakových sil vyvolaných například ventilátorem. Volné proudění vzniká účinkem gravitačních sil. Dále se rozlišuje proudění ve velkém neohraničeném prostoru a malém ohraničeném prostoru. Za malý ohraničený prostor můžeme uvažovat například vzduchovou dutinu mezi skly u okna. U vodorovných konstrukcí je přestup tepla odlišný podle toho, proudí-li tepelný tok zdola nahoru nebo shora dolů. Podle struktury vzduchu může nastat proudění laminární, přechodné nebo turbulentní [4].

2.2.1 Součinitel přestupu tepla při volném proudění

Pro stanovení součinitele přestupu tepla pro volné proudění rozlišujeme proudění svislá, vodorovná a šikmá k poloze konstrukce. Pro součinitel přestupu tepla při volném proudění podél svislé konstrukce v neohraničeném prostoru tedy platí empirická rovnice:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n ,$$

kde: c, n konstanty stanovené experimentálně,

Nu Nusseltovo číslo,

Gr Grashofovo číslo,

Pr Prandtlovo číslo.

Konstanty c, n závisí na druhu a intenzitě proudění. V tepelné technice budov se nejčastěji uplatňují hodnoty $c = 0,135$ a $n = 1/3$. Po dosazení hodnot do vztahu a také příslušných veličin Nusseltova, Grashofova a Prandtlova čísla, můžeme vyjádřit součinitel přestupu tepla ve tvaru:

$$\alpha_k = 1,73 \cdot (t_1 - t_2)^{1/3}.$$

U vodorovných konstrukcí můžeme součinitel přestupu tepla při volném proudění vypočítat ze vztahu platného pro svislé konstrukce, avšak s určitou korekcí. Ta závisí na směru tepelného toku. Hodnota součinitele přestupu tepla stanovená pro svislé konstrukce se zvětšuje o 30 % při tepelném toku zdola nahoru a zmenšuje se o 30 % při tepelném toku shora dolů. Pokud se jedná o šikmé konstrukce tak rozhoduje jejich sklon. U šikmých konstrukcí se sklonem 45° a větším vůči vodorovné rovině se může stanovovat součinitel přestupu tepla podle vztahu platného pro svislé konstrukce. U šikmých konstrukcí se sklonem menším než 45° vůči vodorovné rovině se stanovuje součinitel přestupu tepla lineární interpolací mezi hodnotou stanovenou pro vodorovné konstrukce a svislé konstrukce [4].

Ohraničený prostor se vyskytuje v tepelné technice budov zejména v případě souvislé roviny vrstvy. Ta je charakterizována tloušťkou d , šířkou s a výškou h . Přitom většinou bývá vyplněna vzduchem. Při řešení problémů šíření tepla ve vzduchové vrstvě se rozlišují dva základní případy. První řešení vychází z předpokladu, že tloušťka vrstvy je podstatně menší než šířka a výška $d \ll s, h$. Druhý případ zahrnuje i výšku h .

2.2.2 Součinitel přestupu tepla při nuceném proudění

Jako v případě volného proudění je odvozena empirická rovnice pro stanovení součinitele přestupu tepla při nuceném proudění ve tvaru:

$$Nu = c \cdot Re^n,$$

kde: Re Reynoldsovo číslo.

Konstanty c a n závisí na druhu proudění. V tepelné technice se většinou uvažuje turbulentní proudění s hodnotami konstant $c = 0,0032$ a $n = 0,8$. Po dosazení do vztahu se získá vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla při nuceném proudění:

$$\alpha_k = 6,22 \cdot \frac{v^{0,8}}{h^{0,2}},$$

kde: α_k součinitel přestupu tepla při nuceném proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

v rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

h délka obtékané plochy [m].

Číselná konstanta $6,22 = K_2$ představuje činitel korekce zahrnující hodnotu tepelné vodivosti a kinetické vaznosti platné při určující teplotě $t_{ur} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2.3 Šíření tepla sáláním (radiací)

Sálání tepla se uskutečňuje pomocí elektromagnetických vln o určité vlnové délce. Sálavé teplo proniká průteplivými látkami a může se šířit i ve vakuu. Sálavý tok Q , který dopadá na povrch nějakého tělesa a může rozdělit takto: část Q_R ten se může od jeho povrchu odrazit, část Q_A může být tělesem pohlceno a část Q_T může tělesem projít. Podle energetické rovnice tedy platí:

$$Q = Q_R + Q_A + Q_T$$

nebo v poměrném tvaru:

$$\frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_T}{Q} = 1$$

nebo

$$R + A + T = 1$$

kde: Q_0 celková dopadající energie na těleso [J],

Q_A část energie pohlcená tělesem [J],

Q_R část energie odražená tělesem [J],

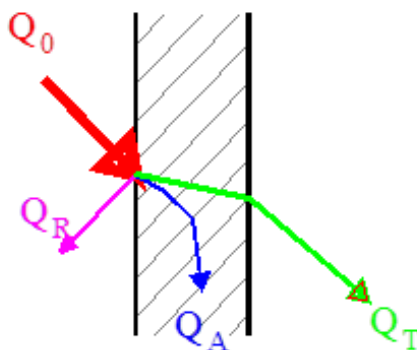
Q_T část energie procházející tělesem [J],

R odrazivost,

A pohltivost,

T propustnost.

Z tohoto vztahu se odvozují ideální tělesa vzhledem k sálání. Jestliže $A = 1$ a zároveň $T = R = 0$, pak to znamená, že těleso pohltí veškerou sálavou energii, která na něj dopadá. Toto těleso se nazývá dokonale černé těleso nebo dokonalý zářič nebo Planckův zářič. Pokud $R = 1$ a zároveň $T = A = 0$, pak těleso odrazí veškerou sálavou energii, která na něj dopadá. Toto těleso se nazývá bílé těleso, je-li odraz difúzní, tak se odraz uskutečňuje podle zákonů geometrické optiky. Tedy úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Poslední případ nastává při splnění podmínky $T = 1$ a zároveň $R = A = 0$, poté těleso propustí veškerou sálavou energii na něj dopadající. V tomto případě se jedná o těleso dokonale propustné.



Obr. 1: Schéma tepelných toků při sálání skrz stavební konstrukci

2.3.1 Zákony sálání

Z vyjmenovaných ideálních těles je nejdůležitější dokonale černé těleso, pro které byly odvozeny základní zákony záření. Všechny veličiny, které se vztahují na dokonale černé těleso, se označují indexem o [4].

Planckův zákon vyjadřuje závislost spektrální intenzity sálání dokonale černého tělesa $I_{\alpha,o}$ na délce vlny λ a termodynamické teplotě T . Z Planckova zákona vyplývá, že s rostoucí teplotou se maximální hodnota $I_{\alpha,o}$ posune ke kratším vlnovým délkám. Tuto závislost můžeme vyjádřit vztahem:

$$\lambda_m \cdot T = 2,9 \text{ mm} \cdot K,$$

kde: λ_m vlnová délka,

T termodynamická teplota.

Tento vztah se nazývá Wienův zákon posuvu. Z něj vyplývá, že délka vlny λ_m , při které vysílá dokonale černé těleso maximum intenzity sálání, je nepřímo úměrné termodynamické teplotě T .

Stefanův a Boltzmannův zákon vyjadřuje plošnou sálavost E_o dokonale černého tělesa.

$$E_o = C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

kde: C_o součinitel sálání dokonale černého tělesa $5,669 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,

E_o plošná sálavost,

T termodynamická teplota.

Tento zákon platí i pro sálání skutečných, šedých těles:

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

2.3.2 Výměna tepla sáláním

Pro výměnu tepla sáláním mezi dvěma navzájem se osálavanými tělesy platí vztahy [4]:

$$Q_{12} = C_{vs} \cdot A_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{12},$$

$$Q_{21} = C_{vs} \cdot A_2 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{21},$$

kde: Q_{12} sálavý tok z tělesa 1 na těleso 2 [W],

Q_{21} sálavý tok z tělesa 2 na těleso 1 [W],

A_1, A_2 příslušné plochy tělesa 1 a 2 [m²],

T_1, T_2 termodynamická teplota tělesa 1 a 2 [K],

φ_{12} osálání mezi tělesy 1 a 2,

φ_{21} osálání mezi tělesy 2 a 1,

C_{sv} součinitel vzájemného sálání mezi plochami A_1 a A_2 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$].

Osálání φ_{12} a φ_{21} jsou geometrické parametry a závisejí na tvaru, poloze, rozměru a vzdálenosti vzájemně se osálávaných ploch. Udávají, jaký díl sálavého toku dopadá na plochu 2 z celkového sálavého toku vyzařovaného tělesem 1 a opačně [4].

Součinitel vzájemného sálání C_{sv} závisí na součinitelích sálání každého z těles, na jejich vzájemné poloze a na velikosti vzájemně se osálávaných ploch.

3. Legislativa

Podle zákona č. 406/2000 Sb. je povinností mít zpracovaný Průkaz energetické náročnosti budovy postupně pro stále více uživatelů budov. Tuto povinnost mají stavebníci, vlastníci budov nebo společenství vlastníků bytových jednotek [5] při:

- výstavbě nových budov,
- větších změnách již dokončených staveb,
- prodeji budovy nebo její ucelené části,
- pronájmu budovy nebo její ucelené části.

Průkaz energetické náročnosti budovy platí 10 let ode dne jeho vyhotovení nebo do provedení větší změny dokončené budovy, nebo do provedení změny způsobu vytápění, chlazení nebo přípravy teplé vody.

Povinnost zpracovat průkaz energetické náročnosti budovy neplatí pro [5]:

- budovy s energeticky vztažnou plochou menší než 50 m²,
- budovy, které jsou kulturní památky, anebo nejsou kulturní památkou, ale nacházejí se v památkové rezervaci,
- budovy navrhované a obvykle používané jako místa bohoslužeb,
- stavby určených pro rodinnou rekreaci,
- stavby zpravodajských služeb,
- stavby důležité pro obranu státu,
- stavby sloužící k ochraně utajovaných informací.

4. Šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy

Základním výpočtem pro energetickou certifikaci budov je stanovení tepelných ztrát obálkou budovy. Je to tzv. obálková metoda, na základě které se stanovuje Energetický štítek obálky budovy.

4.1 Výpočty pro energetický štítek obálky budovy

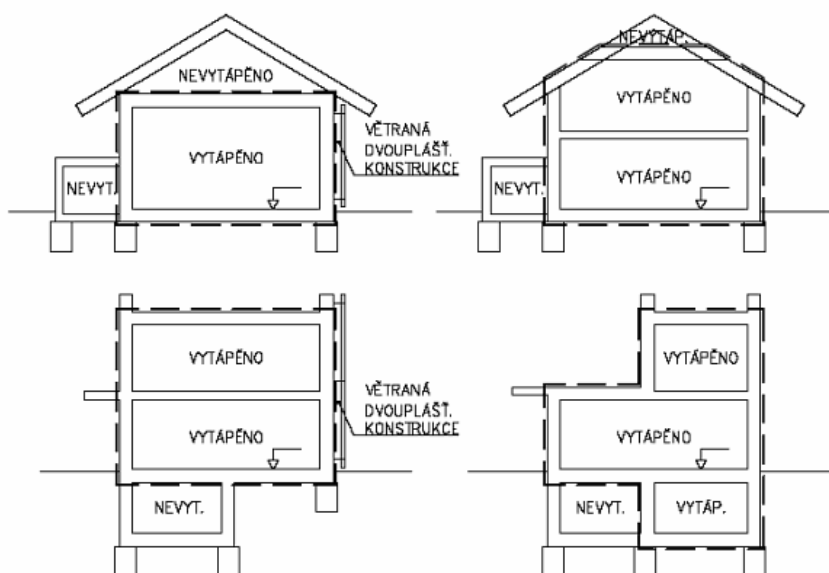
4.1.1 stanovení obvodových konstrukcí

Nejdříve si musíme stanovit plochy obvodových konstrukcí. Dále je důležité znát objem budovy a hranice mezi vytápěným a nevytápěným prostorem. Pro výpočet objemu

a povrchu konstrukcí se pro dvouplášťové budovy uvažuje vnější rozměr konstrukce podle Obr. 2. Do výpočtu nezapočítáváme přečnívající konstrukce jako:

- atiky,
- balkóny,
- lodžie,
- přiléhající nevytápěné části budovy.

Teplosměnná plocha obálky budovy A je tedy vnější povrch objemu budovy V na systémové hranici. Jak stanovit hranici mezi vytápěným a nevytápěným prostorem najdeme v normě ČSN EN ISO 13790.



Obr. 2: Schéma umístění systémové hranice budovy [2]

4.1.2 Stanovení vnějších a vnitřních teplot

Dalším krokem výpočtu je stanovení vnitřní teploty vytápěného prostoru t_i a vnější teploty exteriéru t_e . Pro obytné budovy se uvažuje vnitřní teplota $t_i = 20$ °C. Vnější návrhová teplota se zjišťuje z tabulek, protože závisí na klimatických podmínkách lokality, kde je objekt postaven. Vnější návrhové teploty se uvádí pro jednotlivá města (většinou se jedná o okresní města ČR).

Tab. 2: Vnější návrhové teploty pro vybrané lokality podle [2]

| Lokalita | Nadmořská výška [m n.m.] | t_e [°C] |
|--------------|--------------------------|------------|
| Praha | 181 | -12 |
| Brno | 227 | -12 |
| Ostrava | 217 | -15 |
| Olomouc | 226 | -15 |
| Plzeň | 311 | -12 |
| Liberec | 357 | -18 |
| Karlovy Vary | 379 | -15 |

4.1.3 Stanovení součinitele prostupu tepla

Je nutno stanovit návrhové teploty nevytápěných prostor t_u [°C] a teplotu zeminy, která přiléhá k budově t_g [°C]. Pokud máme stanoveny všechny návrhové teploty, můžeme přistoupit k samotnému výpočtu. Tento výpočet spočívá ve stanovení součinitele prostupu tepla U_j [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] jednotlivých konstrukcí, které tvoří obálku budovy dle vzorce:

$$U_j = \frac{1}{R_j},$$

kde: U_j součinitel prostupu tepla j -té konstrukce [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

R_j tepelný odpor j -té konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]

Vypočítané součinitele prostupu tepla musí splňovat podmínku:

$$U_j \leq U_{em,N}$$

kde: U_j součinitel prostupu tepla j -té konstrukce [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

$U_{em,N}$ požadovaná hodnota součinitele prostupu [2] [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$].

Tab. 3: Vybrané normové hodnoty součinitele prostupu tepla U_N [2]

| Popis konstrukce | Součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] | | |
|--|---|------------------------------------|---|
| | Požadované hodnoty $U_{N,20}$ | Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$ | Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$ |
| Stěna vnější | 0,3 | 0,2 | 0,18 až 0,12 |
| Střecha strmá se sklonem na 45° | 0,3 | 0,2 | 0,18 až 0,12 |
| Střecha plochá se sklonem do 45° včetně | 0,24 | 0,16 | 0,15 až 0,10 |
| Strop s podlahou nad venkovním prostorem | 0,24 | 0,16 | 0,15 až 0,10 |
| Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace) | 0,3 | 0,2 | 0,15 až 0,10 |
| Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace) | 0,3 | 0,2 | 0,18 až 0,12 |
| Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině | 0,45 | 0,3 | 0,22 až 0,15 |
| Strop a stěna vnitřní z vytápěného do nevytápěného prostoru | 0,6 | 0,4 | 0,30 až 0,20 |
| Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru | 0,75 | 0,5 | 0,38 až 0,25 |
| Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí | 0,75 | 0,5 | 0,45 až 0,3 |
| Podlaha a stěna temperovaného prostoru přilehlá k zemině | 0,85 | 0,6 | 0,5 |
| Stěna mezi sousedními budovami | 1,05 | 0,7 | |
| Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně | 1,05 | 0,7 | |
| Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně | 1,3 | 0,9 | |
| Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně | 2,2 | 1,45 | |
| Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně | 2,7 | 1,8 | |
| Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do vnějšího prostředí | 1,5 | 1,2 | 0,8 až 0,6 |
| Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří | 1,4 | 1,1 | 0,9 |
| Šikmá výplň otvoru z vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu) | 1,7 | 1,2 | 0,9 |
| Výplň otvoru vedoucí z vytápěného do temperovaného prostoru | 3,5 | 2,3 | 1,7 |
| Výplň otvoru vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí | 3,5 | 2,3 | 1,7 |
| Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí | 2,6 | 1,7 | 1,4 |

4.1.4 Měrná ztráta prostupem tepla

Měrná ztráta prostupem tepla H_{Tj} se stanoví ze vzorce:

$$H_{Tj} = A_j \cdot U_j \cdot b_j,$$

kde: H_{Tj} měrná tepelná ztráta j -té konstrukce [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$],

A_j plocha [m^2],

U_j součinitel prostupu tepla j -té konstrukce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

b_j redukční teplotní součinitel [-]:

$$b_j = \frac{t_i - t_u}{t_i - t_e},$$

kde: t_i návrhová teplota interiéru [$^{\circ}\text{C}$]

t_u návrhová teplota nevytápěných prostor [$^{\circ}\text{C}$]

t_e návrhová teplota exteriéru [$^{\circ}\text{C}$]

V následujícím kroku je provedena suma všech jednotlivých měrných ztrát prostupem tepla a přičtení přírážky na vazby a tepelné mosty. Tato suma dává dohromady celkovou měrnou ztrátu prostupem tepla. Hodnota přírážky je stanovena v normě ČSN 73 0540-2:2011 [2]. Celková měrná ztráta prostupem tepla se tedy rovná:

$$H_T = \sum_j H_{Tj} + A \cdot \Delta U,$$

kde: H_T celková měrná tepelná ztráta obálkou budovy [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$],

H_{Tj} měrná tepelná ztráta j -té konstrukce [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$],

A celková plocha obálky budovy [m^2],

ΔU přírážka k součiniteli prostupu tepla U .

Dále se stanoví průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} a porovná se s požadovaným součinitelem prostupu tepla $U_{em,N}$ uvedeným v Tab 2.

$$U_{em} = \frac{H_T}{A},$$

kde: H_T celková měrná tepelná ztráta obálkou budovy [$W \cdot K^{-1}$],

A celková plocha obálky budovy [m^2].

Součinitel prostupu tepla $U_{em,N}$ závisí na prostorovém uspořádání budovy, konkrétně na objemovém faktoru tvaru budovy. Ten je dán jako poměr mezi plochou všech obalových konstrukcí A a objemu budovy včetně stavebních konstrukcí V [m^2/m^3].

Tab. 4: Hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla $U_{em,N}$ dle [2]

| Objemový faktor tvaru budovy A/V [m^2/m^3] | Průměrný součinitel prostupu tepla $U_{em,N}$ | |
|---|---|--------------------|
| | Požadované hodnoty | Doporučené hodnoty |
| 0,2 | 1,05 | 0,79 |
| 0,3 | 0,8 | 0,6 |
| 0,4 | 0,68 | 0,51 |
| 0,5 | 0,6 | 0,45 |
| 0,6 | 0,55 | 0,41 |
| 0,7 | 0,55 | 0,39 |
| 0,8 | 0,51 | 0,37 |
| 0,9 | 0,49 | 0,35 |
| 1 | 0,47 | 0,34 |

Z Tab. 4 je patrné, že tepelné ztráty závisí na objemovém faktoru budovy. Pokud je budova hodně členitá, jako například rodinný dům, měly by být jeho konstrukce co nejkvalitněji navrženy. Naopak u konstrukcí hal s jednoduchým tvarem, se konstrukce na výsledné tepelné ztrátě bude podílet mnohem méně.

4.1.5 Zařazování do klasifikačních tříd

Posledním výpočtem je klasifikační ukazatel CI . Tento ukazatel je dán poměrem hodnot průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} a požadované hodnoty součinitele prostupu tepla pro referenční budovu:

$$CI = \frac{U_{em}}{U_{em,N}}$$

kde: CI klasifikační ukazatel [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

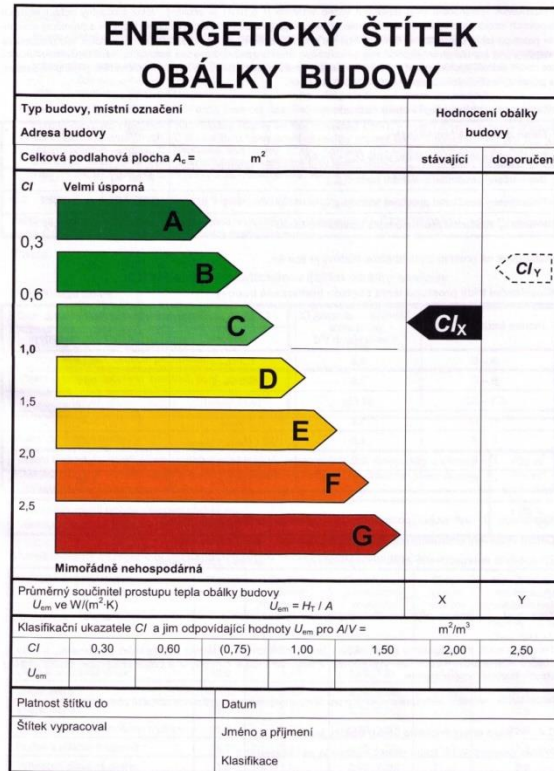
U_{em} průměrný součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

$U_{em,N}$ požadovaný součinitel prostupu tepla u referenční budovy [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Podle klasifikačního ukazatele se budova poté zařazuje do klasifikačních tříd dle normy ČSN 73 0540-2:2011 [2].

Tab. 5: Klasifikační třídy prostupu tepla dle [2]

| Klasifikační třídy | Kód barvy | Průměrný součinitel prostupu tepla budovy [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] | Slovní vyjádření klasifikační třídy | Klasifikační ukazatel |
|--------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------|
| A | X0X0 | $U_{em} \leq 0,5 \cdot U_{em,N}$ | Velmi úsporná | 0,5 |
| B | 70X0 | $0,5 \cdot U_{em,N} < U_{em} \leq 0,75 \cdot U_{em,N}$ | Úsporná | 0,75 |
| C | 30X0 | $0,75 \cdot U_{em,N} < U_{em} \leq U_{em,N}$ | Vyhovující | 1 |
| D | 00X0 | $U_{em,N} < U_{em} \leq 1,5 \cdot U_{em,N}$ | Nevyhovující | 1,5 |
| E | 03X0 | $1,5 \cdot U_{em,N} < U_{em} \leq 2,0 \cdot U_{em,N}$ | Nehospodárná | 2 |
| F | 07X0 | $2,0 \cdot U_{em,N} < U_{em} \leq 2,5 \cdot U_{em,N}$ | Velmi nehospodárná | 2,5 |
| G | 0XX0 | $U_{em} > 2,5 \cdot U_{em,N}$ | Mimořádně nehospodárná | 2,5 |



Obr 3: Příklad energetického štítku obálky budovy

4.2 Výpočty pro simulační program

4.2.1 Budova jako systém místností

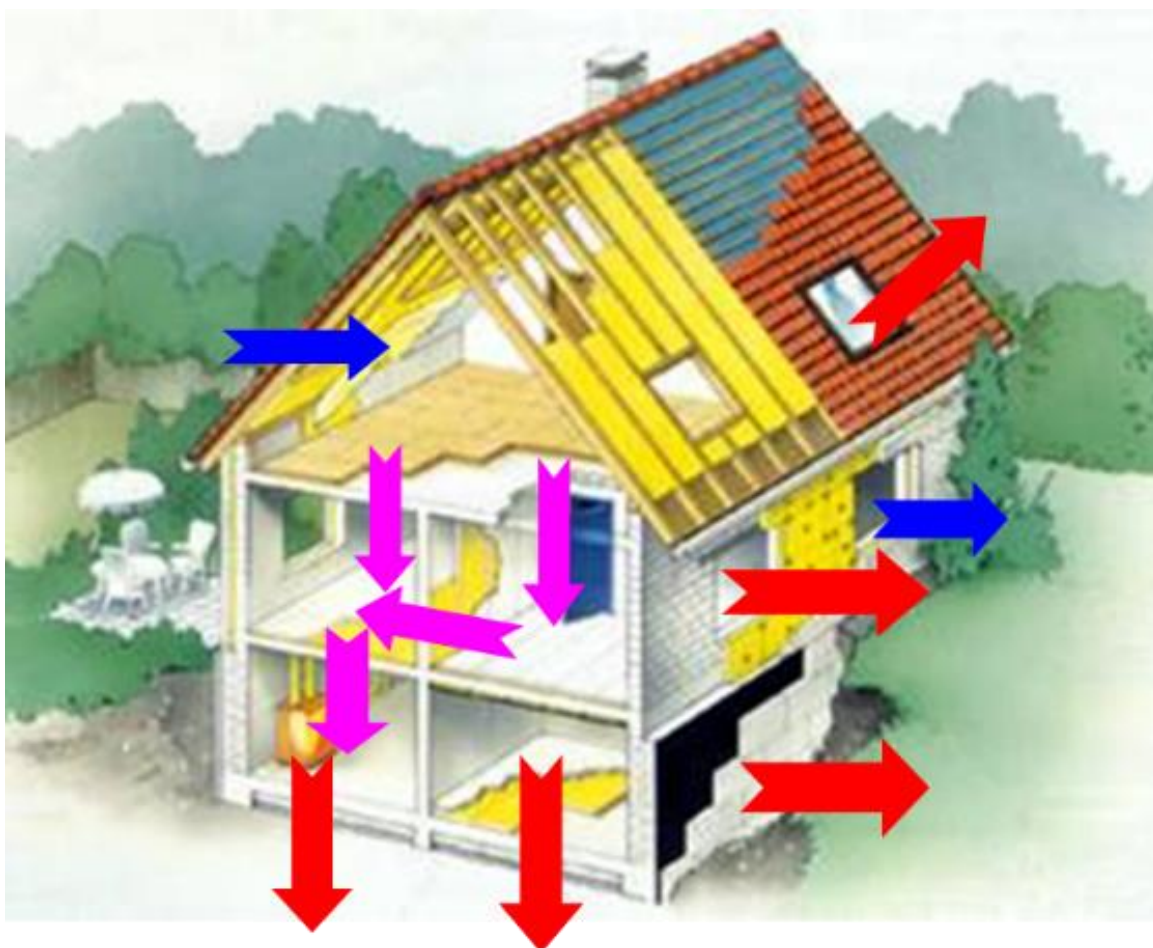
Při řešení problému chladnutí a ohřevu jedné místnosti je nutno vyřešit vztah dané místnosti k místnostem sousedícím a izolovat danou místnost. To se zajistí tak, že se v sousední místnosti uvažuje buď konstantní teplota vzduchu, avšak odlišná od teploty vzduchu v dané místnosti, nebo se může s průběhem času měnit, ale se stejným průběhem jako v dané místnosti.

Průběh teplot v sousedících místnostech však může být odlišný. Je to proto, že místnosti mají různý počet ochlazovaných konstrukcí. Např. rohová místnost, místnost s jednou vnější stěnou a plochou střešou nebo dvě vnější stěny a plochá střeš. V takovýchto místnostech bude také odlišný průběh teploty vzduchu. Sousedí-li místnosti s různým průběhem teploty vzduchu, pak proudí oddělující konstrukcí tepelný tok z místnosti, kde je vyšší teplota vzduchu do místnosti s nižší teplotou vzduchu.

Systemem se rozumí soubor izolovaných prvků a soustava vztahů mezi prvky souboru. Pro existenci systému jsou tedy podstatné dva znaky:

- musí existovat soubor prvků,
- musí existovat vztahy mezi těmito prvky souboru.

Má-li budova alespoň dvě místnosti, lze hovořit o souboru místností v budově, ve kterém každá místnost představuje prvek tohoto souboru. Aby se mohla budova považovat za tepelný systém, musí mezi jednotlivými místnostmi existovat tepelné vazby. Ve vzájemně sousedících místnostech mohou být rozdílné teploty vzduchu, takže tepelný tok může proudit stavebními konstrukcemi, oddělujícími je. Tímto tepelný tok ovlivňuje jejich tepelný stav vnitřního prostředí.



Obr. 4: Schéma uvažovaných tepelných toků v budově

4.2.2 Šíření tepla rovinnou stěnou (případně s vnitřním tepelným zdrojem)

Pro nestacionární vedení tepla platí Fourierova rovnice, která je doplněná o funkci vnitřního tepelného zdroje q_v ve tvaru:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho \cdot c} \quad ; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$
$$\rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + q_v$$

kde: $\rho \cdot c$ objemová tepelná kapacita látky,

a součinitel teplotní vodivosti, který je dán poměrem součinitelem teplotní vodivosti λ a objemovou tepelnou kapacitou.

Numerické řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla

Pro numerické řešení parciální diferenciální rovnice můžeme použít různé metody [7]:

- metodu konečných objemů,
- metodu konečných diferencí,
- metodu konečných prvků.

Jako u obyčejné diferenciální rovnice se začíná tím, že oblast Ω , na které se provádí řešení, se rozdělí na různé elementy (čtverce, kostky, atd.) o hraně h , kde vrcholy tvoří síť uzlů $\Delta x_{i,j}$. Síť často modifikujeme tak, aby elementy co nejlépe vyplnily oblast Ω . Pro lepší pokrytí obrazců je možné použít nejen síť čtvercovou, ale také trojúhelníkovou. Poté však nastává problém se správnou aproximací derivace. Je možné využít síť ortogonální s nestejnými kroky, zjemnění sítě pomáhá vystihnout okraje oblasti a uprostřed lze síť zředit.

Hledané řešení teplot t se aproximuje množinou hodnot $t(x_{i,j}) \approx t_{i,j}$ v uzlech sítě, aby nastala co nejmenší chyba. Proto se použije daná rovnice, ve které se všechny derivace nahradí diferencemi. Poté dostaneme pro každý uzlový bod rovnici. Dále je předložen převod pro funkci jedné proměnné, předpokládá se síť organizovaná podle sloupců a řad značená $(x_{i,j})$.

Pro dané řešení je oblast Ω jednorozměrná, pak lze interval rozdělit na jednotkové úseky. Pro parciální diferenciální rovnici eliptického tvaru předpokládejme například Dirichletovu

úlohu na intervalu $\langle 0,1 \rangle$, s podmínkami $t(\tau, 0) = t(\tau, 1) = 0$ (okrajová) a $t(0, x) = g(x)$ (počáteční). Dále se rozdělí interval $\langle 0,1 \rangle$ na n stejných částí o délce $h = \Delta x$ a časový interval intervalu $\langle 0, T \rangle$ na m stejných intervalů o délce $k = \Delta \tau$. Označíme $t_i^k = t(\tau_k, x_i)$. Z počáteční podmínky platí $t_i^0 = g(x_i)$ a $t(0, x_1) = t(0, x_n) = 0$.

Zvolíme-li dopředu časovou diferenci a symetrické difference pro pozici, dostáváme vyčíslení operátoru $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ a obou časových kroků τ_{k+1} a τ_k s užitím váhového průměrování

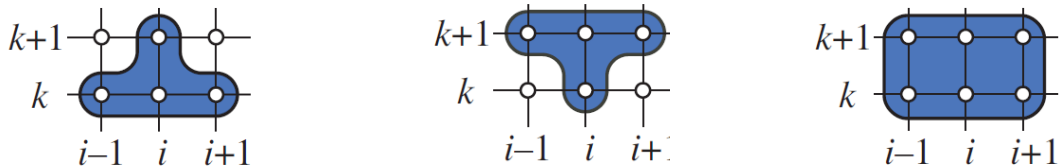
$$\text{vztah: } \frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta \tau} = a \left[\theta \left(\frac{t_{i-1}^{k+1} - 2t_i^{k+1} + t_{i+1}^{k+1}}{\Delta x^2} \right) + (1-\theta) \left(\frac{t_{i-1}^k - 2t_i^k + t_{i+1}^k}{\Delta x^2} \right) \right],$$

kde váhová hodnota $0 \leq \theta \leq 1$,

$\theta = 0 \Leftrightarrow$ metoda FTCS

$\theta = 1 \Leftrightarrow$ metoda BTCS

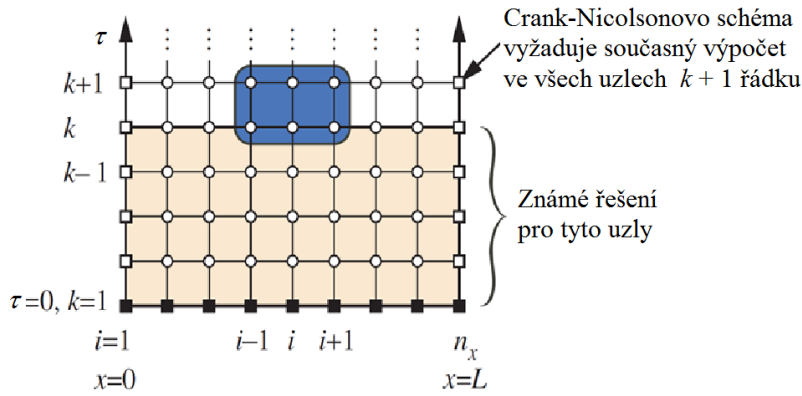
a materiálová vlastnost (ve Fourierově rovnici $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$).



Explicitní metoda (FTCS) Implicitní metoda (BTCS)

Crank Nicolsonova metoda

Obr. 5: Schémata nejčastěji používaných metod pro řešení parciální diferenciální rovnice metodou konečných diferencí [7]



Obr.6: Schéma evolučního principu řešení parciální diferenciální rovnice Crank Nicolsonovou metodou [7]

Crank – Nicolsonova aproximace Fourierovy rovnice šíření tepla:

$$-\frac{a}{2\Delta x^2}t_{i-1}^{k+1} + \left(\frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a}{\Delta x^2}\right)t_i^{k+1} - \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i+1}^{k+1} = \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i-1}^k + \left(\frac{1}{\Delta\tau} - \frac{a}{\Delta x^2}\right)t_i^k + \frac{a}{2\Delta x^2}t_{i+1}^k$$

System rovnice má stejnou strukturu jako BTCS.

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-2,x} & b_{n-2,x} & c_{n-2,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1,x} & b_{n-1,x} & c_{n-1,x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n,x} & b_{n,x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1^{k+1} \\ t_2^{k+1} \\ t_3^{k+1} \\ \vdots \\ t_{n-2,x}^{k+1} \\ t_{n-1,x}^{k+1} \\ t_{n,x}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{n-2,x} \\ d_{n-1,x} \\ d_{n,x} \end{bmatrix},$$

kde pro koeficienty vnitřních uzlů intervalu $i = 2, 3, \dots, n_x$ platí:

$$b_i = \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{\alpha}{\Delta x^2} = \frac{1}{\Delta\tau} - (a_i + c_i)$$

$$a_i = c_i = -\frac{a}{2\Delta x^2}$$

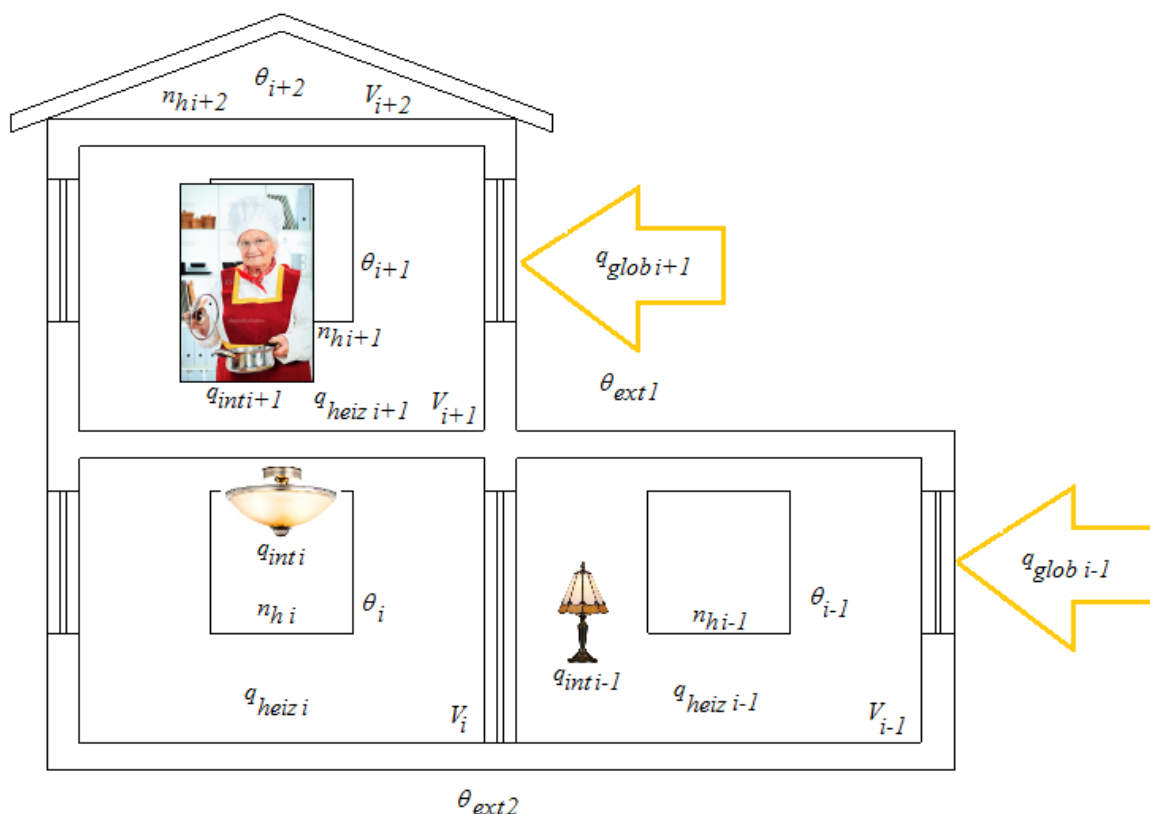
$$d_i = -c_i \cdot t_{i-1}^k + \left(\frac{1}{\Delta\tau} + a_i + c_i\right)t_i^k - b_i t_{i+1}^k$$

Ke Crank Nicolsonově metodě můžeme shrnout:

- Výsledky pomocí výpočtu Crank Nicolsonovou metodou bývají obvykle přesnější než FTCS nebo BTCS,
- Crank-Nicolsonova metoda má nejmenší zaokrouhlovací chybu,
- Crank-Nicolsonova metoda bývá upřednostňována.

4.2.3 Rovnice tepelné rovnováhy – bilanční složky ve smyslu Kirchhoffovy rovnice

Pro ustálený stav musí platit v hodnoceném prostoru rovnováha tepelných toků, tj. součet všech tepelných toků musí být nulový. To znamená, že celkové množství tepla uložené v systému, tzn. v konstrukcích, vnitřním vzduchu, vybavení místnosti apod., se v čase nemění. Pokud do systému proudí tepelný tok, musí z něj proudit identické množství tepla.



Obr. 7: Schéma uspořádání dílčích tepelných toků v budově

Můžeme identifikovat dílčí tepelné toky:

- tepelný tok vstupem do okolního prostředí q_{te} [W],
- tepelný tok vstupem okny / dveřmi do okolních místností q_{ok} [W],
- tepelný tok větráním do okolního / venkovního prostředí, q_{nh} [W],
- tepelný tok od vnitřních zdrojů tepla q_{int_zdroj} [W],
- tepelný tok od vnitřních tepelných zdrojů q_{heiz} [W],
- tepelný tok přicházející do interiéru ve formě slunečního záření q_{glob} [W].

Tab. 6: Bilance tepelných toků i -tého vnitřního prostoru

| | |
|---|--------------------------------|
| $\frac{S_{wand}}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_1}} \cdot \frac{1}{2} [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] = \frac{S_{wand}}{\frac{2}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1}} \cdot [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)]$ | Tepelný tok stěnou |
| $\sum S_{ok} \cdot U_{ok} \cdot \frac{1}{2} [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] = [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] \sum \left(\frac{S_{ok} \cdot U_{ok}}{2} \right)$ | Tepelný tok vedením okny |
| $\sum (q_{glob} \cdot S_{ok} \cdot T_{ok})$ | Sálavý tepelný tok okny |
| $\frac{n_h}{3600} V_{raum} \cdot c_{air} \cdot \frac{1}{2} [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)]$ | Tepelný tok větráním |
| q_{heiz} | Tepelný výkon zdroje tepla |
| q_{int_zdroj} | Tepelný výkon vnitřních zdrojů |
| $\frac{V_{room} \cdot c_{air}}{\Delta \tau} \cdot (t'_i - t_i)$ | Změna teploty v místnosti |

Při zavedení substituce pomocnými proměnnými p :

$$p_{wand} = \frac{S_{wand}}{\frac{2}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1}}$$

$$p_{ok} = \frac{1}{2} \cdot S_{ok} \cdot U_{ok}$$

$$p_{glob} = S_{ok} \cdot T_{ok}$$

$$p_{nh} = \frac{n_h}{2 \cdot 3600} V_{raum} \cdot c_{air}$$

$$p_{raum} = \frac{V_{raum} \cdot c_{air}}{\Delta \tau}$$

Dosazením pomocných proměnných platí:

$$p_{wand} \cdot [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] + \sum [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] \cdot p_{ok} + \sum (q_{glob} \cdot p_{glob}) + p_{nh} \cdot [(t'_i - t'_e) + (t_i - t_e)] + q_{heiz} + q_{int_zdroj} = p_{raum} \cdot (t'_i - t_i)$$

Dále úpravami rovnice:

$$t'_i(\sum p_{ok} + p_{nh} + \sum p_{wand} - p_{raum}) + t'_1(-p_{wand}) = (-t'_e + t_i - t_e) \cdot (\sum p_{ok} - p_{nh}) + \\ + \sum -(q_{glob} \cdot p_{glob}) + -q_{int_zdroj} + \sum (t_i - t_1) \cdot (-p_{wand}) + t_i \cdot (-p_{raum})$$

Výměna vzduchu v místnosti větráním

$$dq = n_h \cdot V \cdot c_{air} \cdot (t_{ext} - t_{int}) d\tau \quad (W)$$

za stacionární podmínky $\frac{dt}{d\tau} = 0$.

| | | Rozsah platnosti |
|-----------|--|--------------------------------|
| \forall | $p_{wand} \cdot [(t'_{sur} - t'_r) + (t_{sur} - t_r)]$ | pro \forall stěnu |
| \forall | $p_{ok} \cdot [(t'_{ext,w} - t'_r) + (t_{ext,w} - t_r)]$ | pro \forall okno |
| \forall | $p_{iglob} \cdot [q'_{iglob} + q_{iglob}]$ | pro \forall okno |
| \exists | $p_{nh} \cdot [(t'_e - t'_r) + (t_e - t_r)]$ | \exists v uzavřeném prostoru |
| $[0..n]$ | $[q_{int\ zisky}' + q_{int\ zisky}]$ | $n_{int\ zisky} \in [0..n]$ |
| \exists | $p_{room} \cdot (t'_r - t_r)$ | \exists v uzavřeném prostoru |

Po úpravách s využitím pomocných symbolů:

$$\sum_{i=1}^{n_{wand}} (p_{wand,i} \cdot [(t'_{sur} - t'_r) + (t_{sur} - t_r)] + \sum_{i=1}^{n_{wand}} p_{ok,i} \cdot [(t'_{ext,w} - t'_r) + (t_{ext,w} - t_r)]) \\ + \sum_{i=1}^{n_{iglob}} p_{iglob,i} \cdot [q_{iglob}' + q_{iglob}] + p_{nh} \cdot [(t'_e - t'_r) + (t_e - t_r)] + [q_{int\ zisky}] \cdot \Delta\tau = \\ = p_{room} \cdot (t'_r - t_r)$$

Tab. 7: Přehled členů tepelné bilance místnosti vycházející z Crank-Nicolsonova principu

| Maticové členy | Vektor pravé strany |
|---|--|
| $t'_r(-p_{wand} - p_{ok} - p_{nh} - p_{room})$ $+ t'_{sur}(+p_{wand})$ $+ t'_{ext,w}(+p_{ok})$ $+ t'_e(-p_{nh})$ | $t_r(+p_{wand} + p_{ok} + p_{nh} - p_{room})$ $+ t_{ext,w}(-p_{ok})$ $+ t_{sur}(-p_{wand})$ $+ t_e(-p_{nh})$ $- q_{int\ zisky}$ $- q_{iglob}' \cdot p_{iglob}$ $- q_{iglob} \cdot p_{iglob}$ |

5. Tepelná akumulace stavebních materiálů

Tepelnou pohodu v budově zásadně ovlivňuje teplostí stálost v místnostech a tepelná akumulace konstrukce stěn. Pokud je tepelná akumulace dostatečná, dokáže konstrukce předat místnosti naakumulované teplo vnitřnímu prostředí. Toto se využívá při rychlém střídání teploty, ke kterému dochází například při střídání dne a noci. Dále se tato vlastnost projevuje například při přerušení dodávky tepla nebo při větrání.

5.1 Plošná tepelná kapacita

Plošnou tepelnou kapacitu [8] lze definovat jako množství tepla, které na 1 m² konstrukce pohltí (vydá) při ohřátí (ochlazení) o jeden teplotní stupeň:

$$C = c \cdot \rho \cdot d,$$

kde: C plošná tepelná kapacita [J·m⁻²·K⁻¹],

c měrná tepelná kapacita materiálu tvořícího konstrukci [J·kg⁻¹·K⁻¹],

ρ objemová hmotnost materiálu [kg·m⁻³],

d mocnost konstrukce [m].

Pokud je konstrukce složena z více vrstev, které jsou složeny z různých materiálů o rozdílných vlastnostech, tak se plošná tepelná kapacita vypočítá jako součet všech plošných kapacit.

Z tepelně akumulačního hlediska závisí na uspořádání vrstev v obvodové konstrukci. Pokud by byla například umístěna vrstva tepelné izolace směrem do interiéru, tak by se nemohlo využít potenciálu nosné konstrukce z hlediska tepelně akumulačních vlastností. Pro výpočet součinitele prostupu tepla U na uspořádání vlastní konstrukce nezáleží.

Například tvárnice YTONG P4-500 o tloušťce 300 mm bude mít plošnou tepelnou kapacitu:

$$C_{YTONG} = c_{YTONG} \cdot \rho_{YTONG} \cdot d = 1000 \cdot 650 \cdot 0,3 = 195000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

A pěnový polystyren PPS o stejné tloušťce bude mít plošnou tepelnou kapacitu:

$$C_{PPS} = c_{PPS} \cdot \rho_{PPS} \cdot d = 1270 \cdot 20 \cdot 0,3 = 7620 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tepelná akumulace je tedy u tvárníc YTONG mnohem větší než u pěnového polystyrenu o stejné tloušťce. Tento příklad je pouze informativní, protože tepelné izolace se většinou o takto velkých mocnostech neprovádí.

5.2 Relaxační doba

Relaxační doba [9] reprezentuje tepelně-akumulační schopnost obvodové stěny. Stěny, které zaujímají vysokou tepelně akumulaci schopnost, mají delší relaxační dobu. Relaxační doba má příznivý vliv na teplotní setrvačnost a tepelnou stabilitu v interiéru.

Pokud se konstrukce nalézá v ustálených podmínkách a pokud dojde k přerušení přívodu tepla, začne vnitřní povrchová teplota klesat rychlostí:

$$\frac{dt}{dT} = \frac{\Delta T}{\tau_0},$$

kde: τ_0 relaxační doba [s],

$\frac{dt}{dT}$ rychlost poklesu vnitřní povrchové teploty [$\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$],

ΔT rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou v okamžiku, kdy dojde k přerušení dodávky tepla [K].

Pokud budeme předpokládat, že průběh teplot v konstrukci se v každém okamžiku rovná stacionárním podmínkám, tak můžeme konstantu τ_0 vypočítat pomocí tloušťky d a materiálových konstant jednotlivých vrstev. Pro jednovrstvou konstrukci:

$$\tau_0 = \frac{d^2}{2a},$$

kde: τ_0 relaxační doba [s],

d tloušťka vrstvy [m],

a součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

5.3 Tepelná jímavost

Tepelná jímavost je další veličina, která popisuje tepelně akumulční vlastnosti konstrukce. Jedná se o schopnost daného materiálu přijímat teplo a je dána vzorcem:

$$b = \lambda \cdot \rho \cdot c$$

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Nevýhodou materiálů s dobrými tepelně akumulčními vlastnostmi je dodání počáteční energie k naakumulování počátečního tepla. Je třeba si dávat pozor na navrhování skladby obálky budovy z ohledu na měnící se roční období v České republice. V létě totiž může narušit vnitřní tepelnou pohodu přehřívání. Při tomto jevu je tepelný tok opačný, tedy z exteriéru do interiéru. Tomuto jevu lze zamezit:

- dobrou skladbou obálky budovy,
- vhodným rozmístěním oken,
- orientací budovy vzhledem ke světovým stranám.

Tab. 8: Přehled tepelně akumulčních vlastností vybraných materiálů obvodových konstrukcí [10]

| | Materiál | Objemová hmotnost [kg.m ⁻³] | Měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
|--|--|---|---|
| materiály tvořící nosnou konstrukci budovy | Keramické tvárnice HELUZ AKU 20 | 1000 | 1020 |
| | Vnější tvárnice YTONG P6-700 | 850 | 1000 |
| | Beton hutný | 2100-2300 | 1020 |
| | železobeton | 2300-2500 | 1020 |
| | Broušený cihelný blok POROTHERM 30 P+D | 900 | 960 |
| | Dřevo rostlé (tvrdé i měkké) | 400-600 | 2510 |
| | Beton cihlový (neautoklávovaný) | 1300-1800 | 840 |
| | Beton z keramzitu | 800-1700 | 880 |
| Izolační a obkladové materiály | Pěnový polystyren PPS | 10-60 | 1270 |
| | Pěnový polystyren extrudovaný EXP | 30 | 2060 |
| | Materiály z minerální plsti | 100-300 | 880 |
| | Materiály z minerálních vln, lisované | 150-500 | 1150 |
| | Sádkokarton | 750 | 160 |
| | Omítky (vápenné, vápenocementové) | 1600-2000 | 790-840 |
| | Tepelně izolační omítky | 150-500 | 790-840 |

6. Očekávaný vývoj budov z hlediska energetické náročnosti

V roce 2010 vyšla Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov, která pozměňuje předchozí Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2002/91/ES o energetické náročnosti budov. Tato směrnice mimo jiné nařizuje členským státům Evropské unie:

1. do 31.12. 2020 byly všechny nové budovy měly téměř nulovou spotřebu energie,
2. po dni 31.12. 2018 nové budovy užívané a vlastněné orgány veřejné moci byly budovy s téměř nulovou spotřebou energie.

Tato směrnice nařizuje také zavedení certifikace budovy. V České republice tyto certifikáty zastupují Průkazy energetické náročnosti budovy.

6.1 Domy s nízkou spotřebou energie

Tab. 9: Charakteristika budov s odlišnou spotřebou tepla na vytápění [2]

| Domy běžné v 70.-80. letech | Současná novostavba | Nízkoenergetický dům | Pasivní dům | Nulový dům, dům s přebytkem tepla |
|---|---|---|---|--|
| Charakteristika | | | | |
| zastaralá otopná soustava, zdroj tepla je velkým zdrojem emisí; větrá se pouhým otevřením oknem, nezateplené, špatně izolující konstrukce, přetápí se | klasické vytápění pomocí plynového kotle o vysokém výkonu, větrání otevřením okna, konstrukce na úrovni požadavků normy | otopná soustava o nižším výkonu, využití obnovitelných zdrojů, dobře zateplené konstrukce, řízené větrání | řízené větrání s rekuperací tepla, vynikající parametry tepelné izolace, velmi těsné konstrukce | parametry min. na úrovni pasivního domu, velká plocha fotovoltaických panelů |
| potřeba tepla na vytápění [kWh/(m²·a)] | | | | |
| většinou nad 200 | 80-140 | méně než 50 | méně než 15 | méně než 5 |

6.1.1 Nízkoenergetické domy

Základem návrhu nízkoenergetického domu je vyváženost složek ovlivňující energetickou bilanci budovy. Nízkoenergetický dům je běžná stavba, u které nesmí roční plošná měrná potřeba tepla na vytápění přesáhnout $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Tyto domy potřebují kvalitní návrh a provedení bez tepelných mostů.

Základní kritéria pro návrh nízkoenergetického domu:

- spotřeba tepla na vytápění nesmí přesáhnout $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,
- vysoká vzduchotěsnost,
- regulace vytápění a větrání pomocí speciálních systémů,
- co nejjednodušší tvar bez výčnělků,
- správná orientace ke světovým stranám,
- regulace vytápění využívající tepelné zisky.

6.1.2 Pasivní domy

Pro návrh pasivního domu je stěžejní kvalitní tepelně izolační vlastnost obálky budovy, hlavně fasády, základů, stěn, oken, dveří a podlahy v nejnižším nevytápěném podlaží. Pro pasivní jsou základní znaky:

- kompaktní tvar,
- orientace umístění na pozemku,
- izolační schopnost,
- větrání s rekuperací,
- obnovitelné zdroje,
- vzduchotěsnost obálky.

Měrná potřeba tepla u pasivního domu je maximálně $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Důležité pro pasivní domy je správné navržení otopné soustavy s využitím obnovitelných nebo alternativních zdrojů. Například termické solární kolektory či tepelná čerpadla.

6.1.3 Nulové domy

Hodnocení těchto budov [2] vychází z roční bilance energetických potřeb a energetické produkce v budově a jejím okolí, vyjádřené v hodnotách primární energie. U nulového domu. Předpokládáme, že bude připojen na obvyklou energetickou síť.

Pro tyto domy jsou stanoveny dvě základní úrovně hodnocení:

Úroveň A – do energetických potřeb budovy se zahrnuje potřeba tepla na vytápění, potřeba energie na chlazení, energie na přípravu teplé vody, pomocná elektrická energie na provoz energetických systémů budovy, elektrická energie na umělé osvětlení a elektrické spotřebiče

Úroveň B – jako A, pouze bez zahrnutí elektrické energie na elektrické spotřebiče.

Tab. 10: Základní požadavky na energeticky nulové budovy [2]

| Závaznost kritéria | | Požadovaná hodnota | Doporučená hodnota | Požadovaná hodnota podle zvolené úrovně hodnocení | |
|--------------------|-----------------|---|---|---|----------|
| | | Průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} [W/(m ² ·K)] | Měrná potřeba tepla na vytápění E_a [W/(m ² ·K)] | Měrná roční bilance potřeby a produkce energie vyjádřená v hodnotách primární energie z neobnovitelných zdrojů PE_A [W/(m ² ·K)] | |
| | | | | Úroveň A | Úroveň B |
| Obytné budovy | Nulový | Rodinné domy $\leq 0,25$ | Rodinné domy $\leq 0,20$ | 0 | 0 |
| | Blízký nulovému | Bytové domy $\leq 0,35$ | Bytové domy $\leq 0,15$ | 80 | 30 |
| Neobytné budovy | Nulový | $\leq 0,35$ | $\leq 0,30$ | 0 | 0 |
| | Blízký nulovému | | | 120 | 90 |

6.2 Konstrukční materiály nosných obvodových konstrukcí

6.2.1 Konstrukční systém z cihelného zdiva

Pro jednovrstvé obvodové zdivo nulových a pasivních domů je možno využít broušené cihly HELUZ FAMILY 50 2in1 [11]. Tyto cihly je možno použít bez dodatečného zateplení, protože jejich dutiny jsou vyplněny polystyrénem. Díky nim došlo k navýšení

jejich tepelně izolačních vlastností až o 40 %, při zachování paropropustnosti. Tyto cihly mají součinitel prostupu tepla $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti $0,058 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.



Obr. 8: Vzhled broušené cihly
HELUZ FAMILY 50 2in1
[11]

Pro jednovrstvou konstrukci můžeme použít broušený cihelný blok od firmy Porotherm a to například cihlu s označením Porotherm 44 T Profi [12]. Do dutin tohoto cihelného bloku je umístěna hydrofobizovaná minerální vata. Součinitel prostupu tepla této cihly je $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti $0,066 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.



Obr. 9: Fotografie broušené
cihly Porotherm 44 T Profi
[12]

6.2.2 Konstrukční systém z pórobetonového zdiva

Pro tento systém je možno využít tvárnic z autoklávovaného betonu od firmy YTONG. Tepelněizolační tvárnice slouží jako nosné i nenosné obvodové i vnitřní stěny. Součinitel prostupu tepla je u těchto tvárnic $0,192 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti se rovná $0,089 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

6.2.3 Konstrukční systémy z jiných materiálů

Pro konstrukční systémy lze využít také materiály na bázi dřeva, případně betonu. Přehled tepelných vodivostí těchto materiálů je uveden v Tab. 11.

Tab. 11: Přehled součinitelů tepelné vodivosti dalších materiálů [10].

| Materiál | | λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] |
|-------------|---------------------------------|---|
| Dřevo měkké | Tepelný tok rovnoběžně s vlákny | 0,41 |
| | Tepelný tok kolmo k vláknům | 0,18 |
| Dřevo tvrdé | Tepelný tok rovnoběžně s vlákny | 0,49 |
| | Tepelný tok kolmo k vláknům | 0,22 |
| Beton | Prostý hutný beton | 1,36 |
| | Železobeton | 1,74 |

6.3 Izolační materiály

6.3.1 Expandovaný polystyren - bílý

Expandovaný polystyren je jeden z nejpoužívanějších izolantů. Tento polystyren se označuje zkratkou EPS. Pro stavební účely se využívá EPS 70 až EPS 150. Vyrábí se napěněním polystyrenových perlí o různých velikostech. Lze jej použít jako tepelně izolační vrstva ploché střechy nebo jako izolace do podlahy s malou zátěžovou hmotností. Největší využití je však jako izolační vrstva zateplování systémů ETICS. Expandovaný polystyren je bílý, málo nasákavý a cenově dostupný.

Tab. 12: Přehled základních fyzikálních vlastností EPS bílého vzhledu [13]

| Základní fyzikální vlastnosti EPS - bílý | |
|--|--------|
| Součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | 0,04 |
| Faktor difúzního odporu μ | 20-100 |
| Objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³] | 12-40 |
| Třída reakce na oheň | E |

6.3.2 Expandovaný polystyren – grafitový

Je podobný expandovanému polystyrenu bílému, ale při výrobě je použita přísada z grafitových nanočástic. Díky této přísadě grafitový EPS dosahuje lepších hodnot součinitele tepelné vodivosti.

Tab. 13: Přehled základních fyzikálních vlastností EPS s koloidním grafitem [13]

| Základní fyzikální vlastnosti EPS - grafitový | |
|---|--------|
| Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | 0,03 |
| Faktor difúzního odporu μ | 20-100 |
| Objemová hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | 12-40 |
| Třída reakce na oheň | E |

6.3.3 Extrudovaný polystyren

Tento materiál se označuje zkratkou XPS a za touto zkratkou se udává napětí při 10% stlačení. Základní surovinou pro výrobu je ropa. Dále polystyrenový granulát, který se extruduje společně s rozpínavými plyny. XPS vyniká svou téměř nulovou nasákavostí a velkou pevností v tlaku.

Tab. 14: Základní fyzikální vlastnosti XPS [13]

| Základní fyzikální vlastnosti XPS | |
|---|-------------|
| Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | 0,035-0,038 |
| Faktor difúzního odporu μ | 50-150 |
| Objemová hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | 20-40 |
| Třída reakce na oheň | E |



Obr. 10: Vzhled desky XPS [13]



Obr. 11: Vyobrazení bloku EPS grafitový [13]

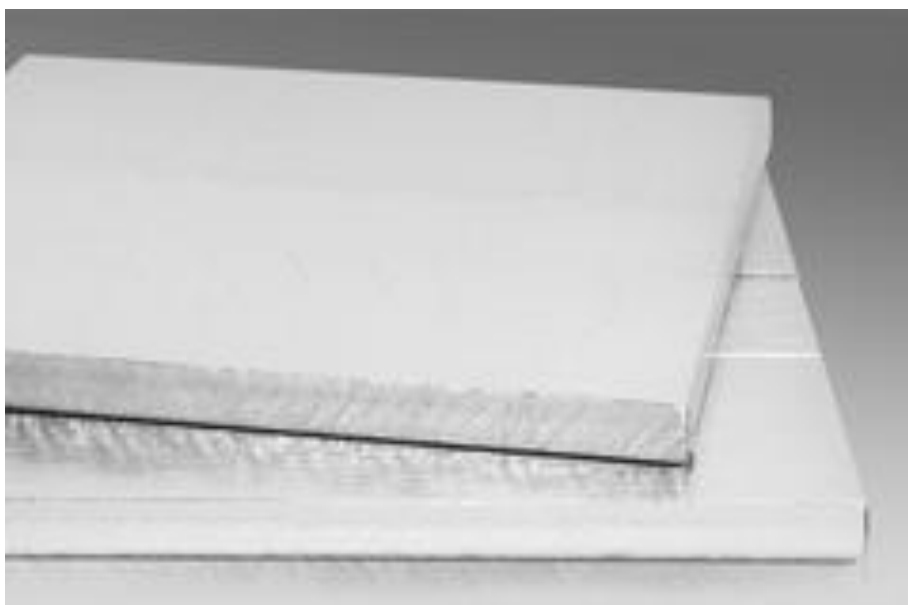


Obr. 12 Vzhled desky EPS bílý [13]

6.3.4. Vakuová izolace

Jedna z nejúčinnějších izolací, při malé tloušťce dokáže nahradit silnou vrstvu klasické izolace. Základem vakuové izolace je nosné jádro, které je na bázi disperzního křemíkového prášku. Tento materiál se poté zabalí do metalizované fólie a vysaje se z něj vzduch. Díky vzniklému vakuu je zabráněno přenosu tepla pomocí konvekce. Pro součinitel tepelné vodivosti se dosahuje hodnot 0,005 W/(m·K). Tyto izolace lze použít jako:

- vnější izolace střech nebo stropů pod hydroizolací,
- vnější izolace střech nebo stropů pod zakrytím,
- izolace mezi krokvemi,
- izolace pro podlahy a terasy,
- vnější i vnitřní izolace stěn,
- izolace plochých střech.

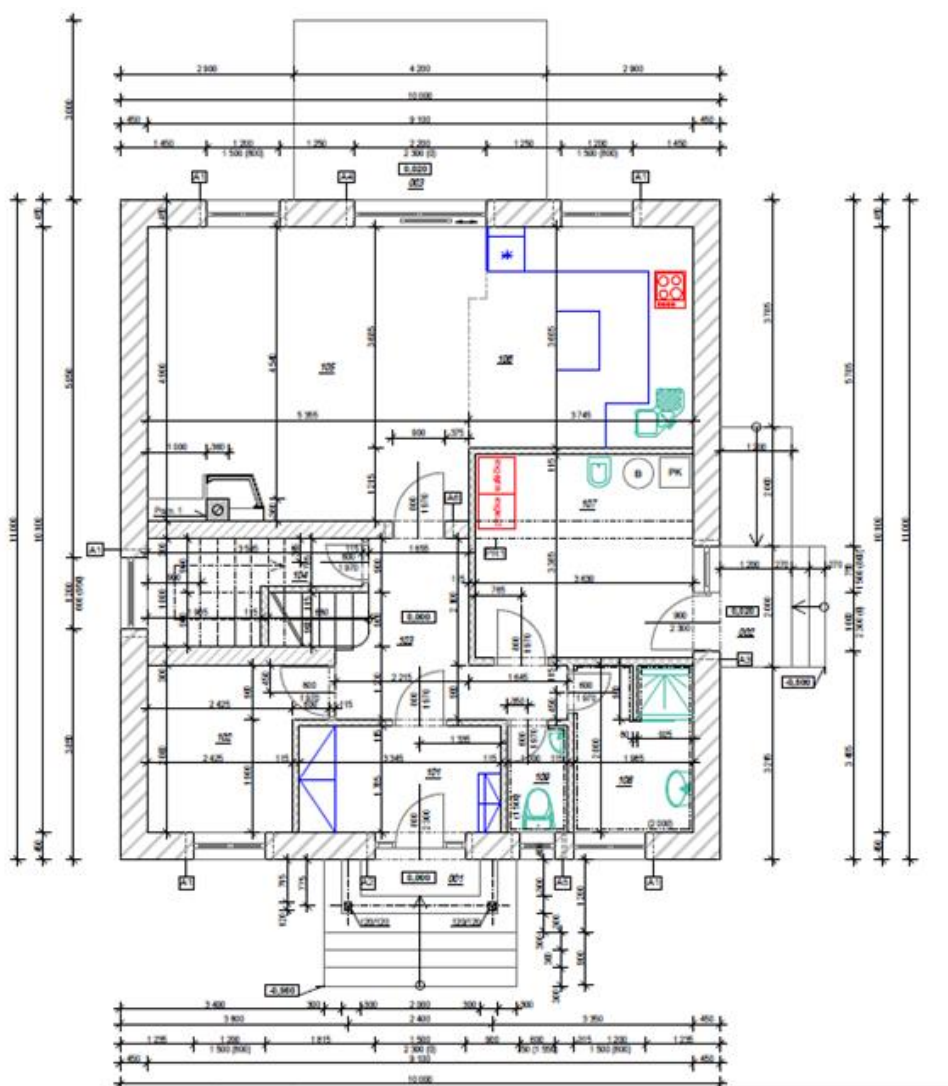


Obr. 13: Fotografie desek vakuové izolace VACUPOR NT-B2-S [14]

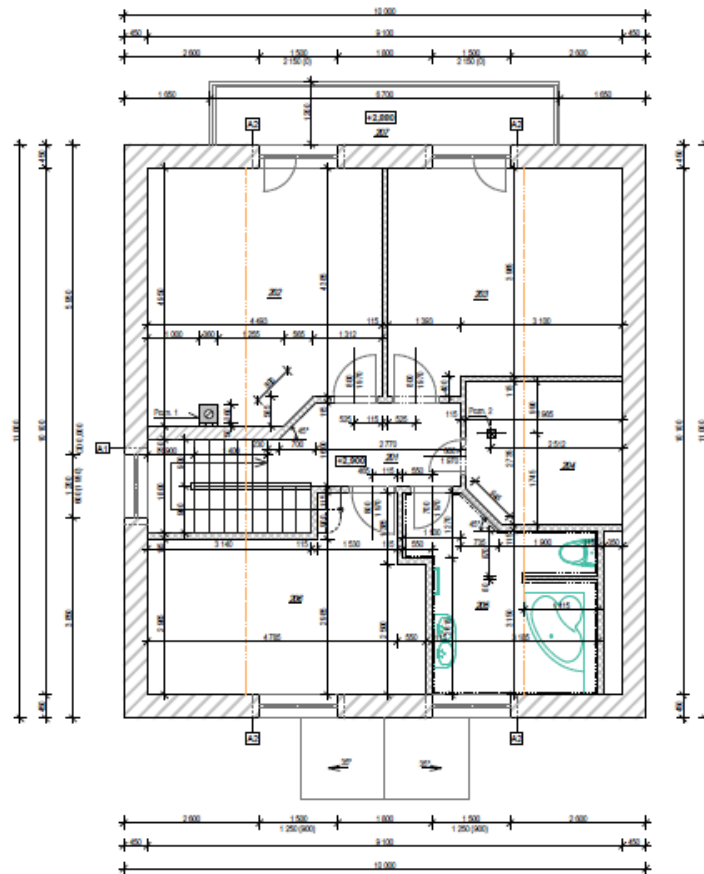
7. Experimentální část

7.1 Popis vybraného objektu

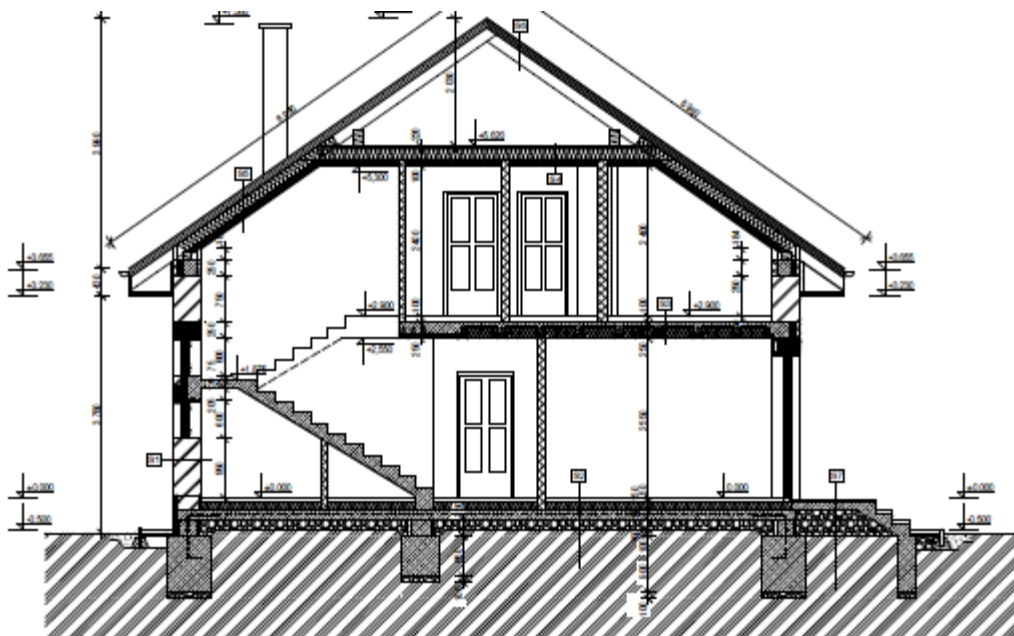
Pro vypracování energetického štítku obálky budovy, průkazu energetické náročnosti budovy a simulační výpočty v rámci referenčního klimatického roku byl vybrán dvoupodlažní rodinný dům. Půdorysný modul domu činí 10 x 11 metrů. V objektu se nachází 11 místností. Obvodové zdivo je tvořeno keramickými tvarovkami POROTHERM EKO+ tl. 450 mm zděnými na termomaltu POROTHERM TM a 30 mm vnější tepelně izolační omítky. Okna jsou plastová s trojsklem, dveře jsou také plastová, prosklená s trojsklem. Zateplený je pouze strop nad podkrovím a část střešní konstrukce. Použitá izolace - Isover Unirol Profi.



Obr. 14: Výkres půdorysu 1.NP vybraného objektu



Obr. 15: Půdorysné uspořádání podkroví vybraného objektu



Obr. 16: Schéma vybraného objektu v řezu

7.2 Energetický štítek obálky budovy

Venkovní návrhová teplota v zimním období v místě stavby se uvažuje $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a převažující vnitřní návrhová teplota v budově v topném období $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tab. 15: Přehled geometrických charakteristik posuzované budovy

| Parametr | jednotky | hodnota |
|---|---------------------------|----------------|
| Objem budovy V | $[\text{m}^3]$ | 591,3 |
| Celková plocha obálky budovy A | $[\text{m}^2]$ | 448,9 |
| Objemový faktor tvaru budovy A/V | $[\text{m}^2/\text{m}^3]$ | 0,76 |
| Celková energeticky vztažná plocha budovy A_c | $[\text{m}^2]$ | 220 |

Tab. 16: Měrná tepelná ztráta a součinitel prostupu tepla, část - 1

| Konstrukce obálky budovy | Referenční budova | | | | Hodnocená budova | | | |
|---|---|--|------------------------|--|---|--|------------------------|--|
| | Plocha A [m ²] | Součinitel prostupu tepla $U_{N,20}$ [W/m ² ·K] | Redukční činitel b [-] | Měrná ztráta prostupem tepla H_T [W/K] | Plocha A [m ²] | Součinitel prostupu tepla $U_{N,20}$ [W/m ² ·K] | Redukční činitel b [-] | Měrná ztráta prostupem tepla H_T [W/K] |
| Vnější stěna Porotherm EKO+ 450mm+30mm tepelněizol. mítka | 194,8 | 0,3 | 1 | 58,43 | 194,8 | 0,22 | 1 | 43,23 |
| Strop nad podkrovím zateplený 300mm Isover Unirol Plus | 54,5 | 0,24 | 1 | 13,09 | 54,5 | 0,15 | 1 | 8,4 |
| Střešní konstrukce - šikmina zateplená 320 mm | 56,6 | 0,24 | 1 | 13,58 | 56,6 | 0,16 | 1 | 8,82 |
| Okna sever, plastové, trojsklo | 8,3 | 1,5 | 1 | 12,38 | 8,3 | 0,82 | 1 | 6,75 |
| Dveře vstupní sever, plastové prosklené trojsklem | 3,5 | 1,5 | 1 | 5,18 | 3,5 | 1,15 | 1 | 3,98 |
| Okna východ, plastové trojsklo | 1,1 | 1,5 | 1 | 1,7 | 1,1 | 0,84 | 1 | 0,95 |
| Dveře východ, plastové prosklené trojsklem | 2,5 | 1,5 | 1 | 3,8 | 2,5 | 1,28 | 1 | 3,24 |
| Okna jih, plastové trojsklo | 15,1 | 1,5 | 1 | 22,67 | 15,1 | 0,82 | 1 | 12,35 |
| Střešní okna Velux kyvné | 1,1 | 1,4 | 1 | 1,54 | 1,1 | 1,33 | 1 | 1,47 |
| Okna západ, plastové, trojsklo | 1,4 | 1,4 | 1 | 2,16 | 1,4 | 0,86 | 1 | 1,24 |
| Přirážky na tepelné vazby | $U_{em}=0,02\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_{em}=0,02\cdot 338,9$ | | 1 | 6,78 | $U_{em}=0,02\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_{em}=0,02\cdot 338,9$ | | 1 | 6,78 |
| Podlaha pod 1 N.P. zateplená EPS 150 mm | 110 | 0,45 | 0,48 | 22,39 | 110 | 0,24 | 0,63 | 15,72 |
| Přirážka na tepelné vazby | $U_{em}=0,02\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_{em}=0,02\cdot 110,0$ | | 0,48 | 2,2 | $U_{em}=0,02\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_{em}=0,02\cdot 110,0$ | | 0,63 | 2,2 |
| Celkem bez vlivu U_{em} | 448,9 | - | - | 156,88 | 448,9 | - | - | 106,16 |
| tepelné vazby | 2% | | | 8,98 | 2% | | | 8,98 |
| celková měrná tepelná ztráta prostupem tepla | - | - | - | 165,89 | - | - | - | 115,14 |

Tab. 17: Hodnoty měrné tepelné ztráty a součinitele prostupu tepla, část - 2

| | | | | |
|---|--|-------------------------|---|------------------------|
| průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} | $U_{em,N,20} = \sum(U_{N,20,j} \cdot A_j \cdot b_j + \Delta U_{em,N,20} \cdot A_j) / \sum A_j$ | požadovaná hodnota 0,37 | $U_{em} = \sum(U_{j} \cdot A_j \cdot b_j + \Delta U_{em,j} \cdot A_j) / \sum A_j$ | Vypočtená hodnota 0,26 |
| | | doporučená hodnota 0,28 | | - |
| Klasifikační třída obálky budovy | 0,26 / 0,37 = 0,69 | | Třída B - úsporná | |

Posuzovanou budovu lze zařadit z hlediska průměrného součinitele prostupu tepla do klasifikační třídy obálky budovy B.

| ENERGETICKÝ ŠTÍTEK OBÁLKY BUDOVY | | | | | | |
|--|---------------|-------------|------|-------------------------|------------|------|
| Typ budovy: | | Rodinný dům | | Hodnocení obálky budovy | | |
| Adresa budovy (místo, ulice, popisné číslo, PSČ): | | | | | | |
| Katastrální území: | | | | | | |
| Parcelní číslo: | | | | | | |
| Celková podlahová plocha $A_v = 220$ [m ²] | | | | stávající | doporučení | |
| CI | velmi úsporná | | | 0,69 | | |
| 0,50 | A | | | | | |
| 0,75 | B | | | | | |
| 1,00 | C | | | | | |
| 1,50 | D | | | | | |
| 2,00 | E | | | | | |
| 2,50 | F | | | | | |
| | G | | | | | |
| KLASIFIKACE | | | | B | - | |
| Průměrný součinitel prostupu tepla obálky budovy U_{em} [W/(m ² K)] $U_{em} = H_t/A$ | | | | 0,26 | - | |
| Požadovaná hodnota průměrného součinitele prostupu tepla obálky budovy podle ČSN 73 0540-2 $U_{em,req}$ [W/(m ² K)] | | | | 0,37 | - | |
| Klasifikační ukazatele CI a jim odpovídající hodnoty U_{em} | | | | | | |
| CI | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 |
| U_{em} | 0,18 | 0,28 | 0,37 | 0,55 | 0,74 | 0,92 |
| Platnost štítku do (datum): | | | | | | |
| Jméno a příjmení: | | | | | | |

Obr. 17: Energetický štítek obálky budovy posuzované budovy

7.3 Průkaz energetické náročnosti budovy

Vytápění ve vybraném objektu bude zajišťováno teplovodně pomocí otopných těles. Zdrojem tepla v budově bude kondenzační plynový kotel. Regulace vytápění řízená ručně pomocí pokojového termostatu, regulace teple vody – automatická.

Tabulky pro zhotovení Průkazu energetické náročnosti budovy byly vygenerovány pomocí programu Energie verze 4.2.11.

Tab. 18: Technické systémy – vytápění

| Hodnocená budova/zóna | Typ zdroje | Energonositel | Pokrytí dílčí potřeby energie na vytápění | Jmenovitý tepelný výkon | Účinnost výroby energie zdrojem tepla $\eta_{N,gen}$ | Účinnost distribuce energie na vytápění $\eta_{H,dis}$ | Účinnost sdílení energie na vytápění $\eta_{H,em}$ |
|--------------------------|------------|---------------|---|-------------------------|--|--|--|
| | (-) | (-) | [%] | [kW] | [%] | [%] | [%] |
| Referenční budova | x | x | x | x | 80 | 85 | 80 |
| Z1 | K 1 | zemní plyn | 100 | 16 | 94 | 89 | 85 |

Tab. 19: Technické systémy – příprava teplé vody TV

| Hodnocená budova | Systém přípravy TV v budově | Energo-nositel | Pokrytí dílčí potřeby energie na přípravu teplé vody | Jmenovitý příkon pro ohřev TV | Objem zásobníku TV | Účinnost zdroje tepla pro přípravu teplé vody $\eta_{W,gen} / COP_{W,gen}$ | Měrná tepelná ztráta zásobníku teplé vody vztážená k objemu zásobníku v litrech $Q_{W,st}$ | Měrná tepelná ztráta rozvodů teplé vody vztážená k délce rozvodů teplé vody $Q_{W,dis}$ |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|--|-------------------------------|--------------------|--|--|---|
| | (-) | (-) | [%] | [kW] | [litry] | [%]/[-] | [kWh/(lden)] | [kWh/(mden)] |
| Referenční budova | x | x | x | x | x | 85 | 0,007 | 0,15 |
| TV1 | TV _{sys1} | Zemní plyn | 100 - 1·STS1 | K-1 [16] | 300 | K-1 [94] | 0,0079 | 0,0607 |
| | | Slunce, energie prostředí | STS1 | STS1 [-] | | STS1 [-] | | |

Tab. 20: Technické systémy – osvětlení

| Hodnocená budova/zóna | Typ osvětlovací soustavy | Pokrytí dílčí potřeby energie na osvětlení | Celkový elektrický příkon osvětlení budovy | Průměrný měrný příkon pro osvětlení vztažený k osvětlenosti zóny |
|-----------------------|------------------------------|--|--|--|
| | | (-) | [%] | [kW] |
| Referenční budova | x | x | x | 0,05 |
| Z1 | žárovky a zářivková svítidla | 100 | 0,278 | 0,05 |

Tab. 21: Přehled o dílčích dodávaných energiích

| ř. | | | Vytápění | | Příprava teplé vody | | Osvětlení | |
|-----|--|----------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Ref. Budova | Hod. budova | Ref. Budova | Hod. budova | Ref. Budova | Hod. budova |
| (1) | Potřeba energie | [kWh/rok] | 12633 | 9716,7 | 3051,4 | 3051,4 | - | - |
| (2) | Vypočtená spotřeba energie | [kWh/rok] | 23222 | 13664 | 6542,2 | 5129,6 | 778,61 | 627,27 |
| (3) | Pomocná energie | [kWh/rok] | 22,79 | 226,99 | 0 | 66 | - | - |
| (4) | Dílčí dodaná energie | [kWh/rok] | 23444 | 13891 | 6542,2 | 5195,6 | 778,61 | 627,27 |
| (5) | Měrná dílčí dodaná energie na celkovou energeticky vztažnou plochu | [kWh/(m ² rok)] | 106,57 | 63,14 | 29,74 | 23,62 | 3,54 | 2,85 |

Tab. 22: Zdroj energie umístěný v budově, na budově nebo pomocných objektech

| Typ výroby | Využitelnost vyrobené energie | Vyrobená energie | Faktor celková primární energie | Faktor neobnovitelné primární energie | Celková primární energie | Neobnovitelná primární energie |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | [kWh/rok] | [-] | [-] | [kWh/rok] | [kWh/rok] |
| Solární termické systémy QH,SC,sys | Budova | 2009,3 | 1 | 0 | 2009,3 | 0 |
| | Dodávka mimo budovu | - | - | - | - | - |

Tab. 23: Rozdělení dílčích dodaných energií, celkové primární energie a neobnovitelné primární energie podle energonositelů

| Energonositel | Dílčí vypočtená spotřeba energie / pomocná energie | Faktor celkové primární energie | Faktor neobnovitelné primární energie | Celková primární energie | Neobnovitelná primární energie |
|---------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | [kWh/rok] | [-] | [-] | [kWh/rok] | [kWh/rok] |
| elektrická energie | 920,25 | 3,2 | 3 | 2944,81 | 2760,76 |
| Slunce, energie prostředí | 2009,25 | 1 | 0 | 2009,25 | 0 |
| zemní plyn | 16784,44 | 1,1 | 1,1 | 18462,89 | 18462,89 |
| Celkem | 19713,95 | x | x | 23416,95 | 21223,65 |

Tab. 24: Požadavek na celkovou dodanou energii

| | | | | | |
|-----|-------------|-----------------------------|----------|-------------------|-----|
| (6) | Ref. Budova | [kWh/rok] | 30765,13 | Splněno ANO/NE | ANO |
| (7) | Hod. budova | | 19713,95 | | |
| (8) | Ref. Budova | [kWh/(m ² ·rok)] | 139,84 | | |
| (9) | Hod. budova | | 89,61 | | |

Tab. 25: Požadavek na neobnovitelnou primární energii

| | | | | | |
|------|--------------------------|-----------------------------|----------|-------------------|-----|
| (10) | Ref. Budova | [kWh/rok] | 32169,87 | Splněno ANO/NE | ANO |
| (11) | Hod. budova | | 21223,65 | | |
| (12) | Ref. Budova (ř.10/m2) | [kWh/(m ² ·rok)] | 146,23 | | |
| (13) | Hod. budova (ř.11/m2) | | 96,47 | | |

Tab. 26: Primární energie hodnocené budovy

| | | | |
|------|--|-----------|----------|
| (14) | Celková primární energie | [kWh/rok] | 23416,95 |
| (15) | Obnovitelná primární energie (ř. 11-ř. 14) | [kWh/rok] | 2193,3 |
| (16) | Využití obnovitelných zdrojů energie z hlediska primární energie | [%] | 9,37 |

PRŮKAZ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI BUDOVY

vydání podle zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, a vyhlášky č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov

Ulice, číslo: **Branky bez č.p. ke**
staveb.povolení, k.ú. ...

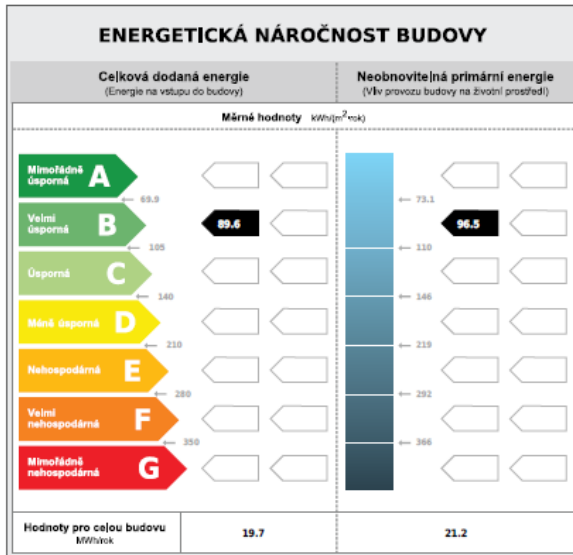
PSC, místo: **756 45, Branky**

Typ budovy: **Rodinný dům**

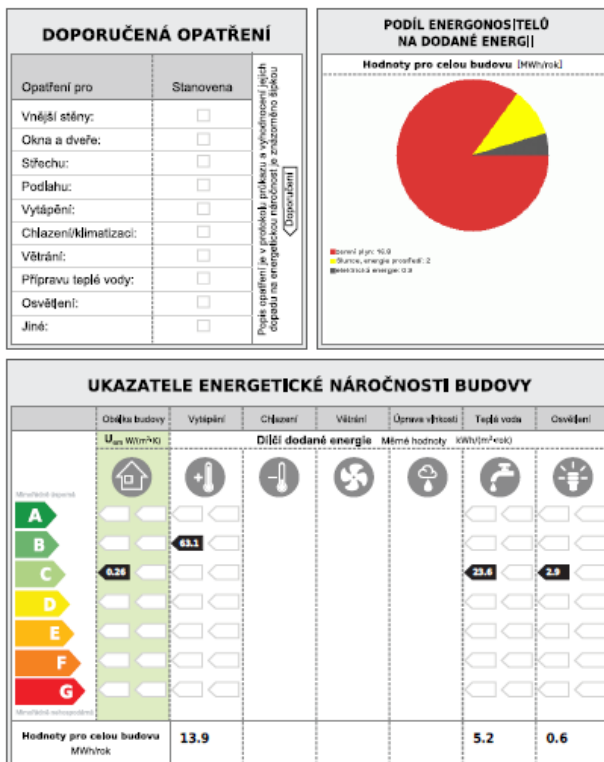
Plocha obálky budovy: **448.87** m²

Objemový faktor Ivaru A/V: **0.76** m³/m³

Celková energeticky vztáhná plocha: **220** m²

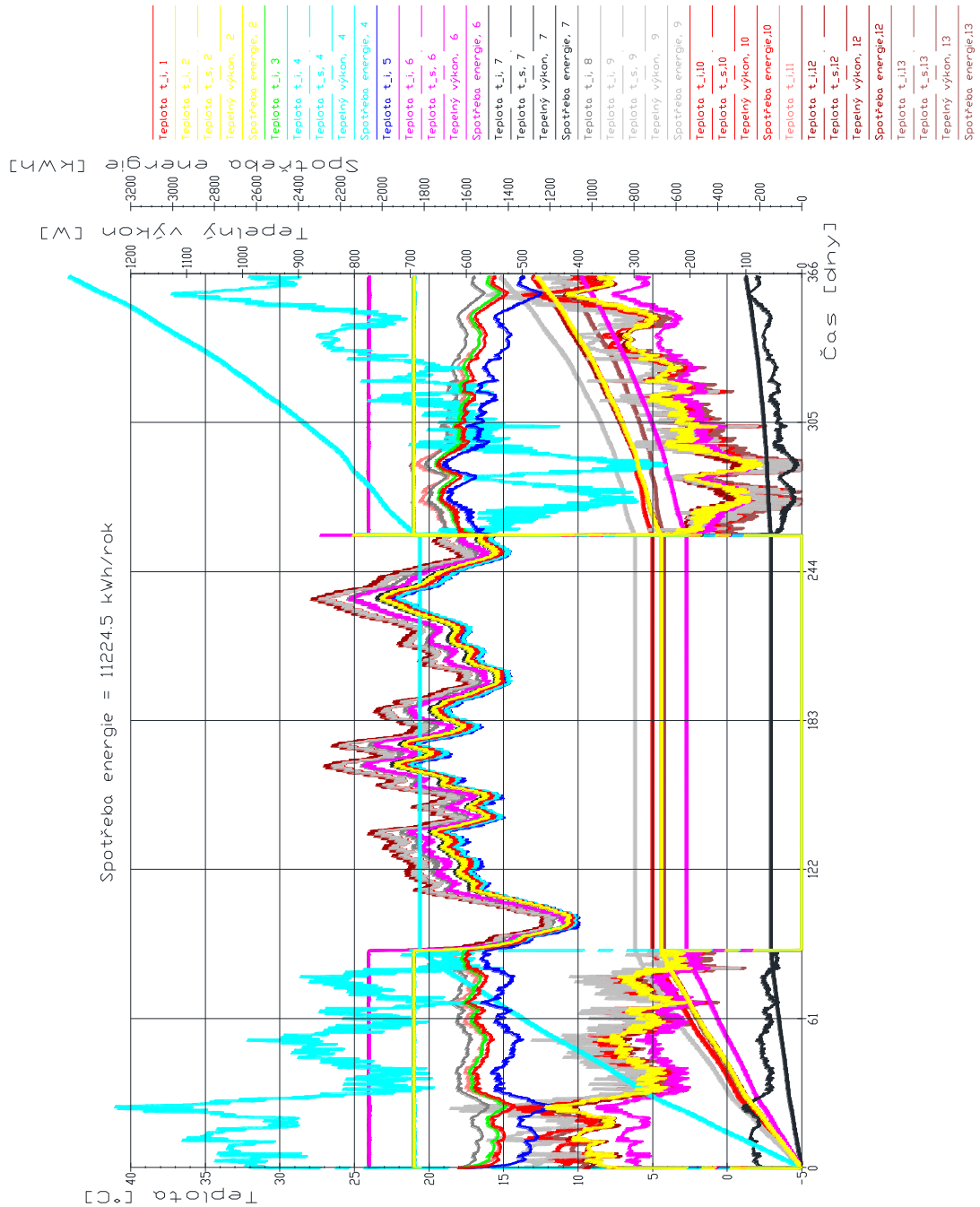



Obr. 18: Průkaz energetické náročnosti posuzované budovy, část 1



Obr. 19: Průkaz energetické náročnosti posuzované budovy, část 2

7.4 Výstupy ze simulačního programu pro referenční rok v podmínkách klimatu ČR



Obr. 20: Grafické vyobrazení teplot vnitřního vzduchu v místnostech, povrchových teplot, tepelných výkonů a spotřeby energie během roku v posuzovaném objektu

7.5 Vyhodnocení

Tab. 27: Přehled požadavků na teplotní stav jednotlivých místností v posuzovaném objektu

| Číslo místnosti | Účel místnosti | Objem [m ³] | Navrhovaná teplota [°C] | Vytápění |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 1 | zádveří | 7,3 | 18 | ne |
| 2 | pracovna | 18,7 | 21 | ano |
| 3 | chodba+schodiště | 22,0 | 18 | ne |
| 4 | obývací pokoj | 39,9 | 21 | ano |
| 5 | technická místnost | 31,8 | 18 | ne |
| 6 | koupelna | 13,9 | 24 | ano |
| 7 | WC | 4,6 | 21 | ano |
| 8 | chodba+schodiště | 22,9 | 18 | ne |
| 9 | ložnice | 46,9 | 21 | ano |
| 10 | pokoj | 40,6 | 21 | ano |
| 11 | šatna | 17,5 | 18 | ne |
| 12 | koupelna | 24,8 | 24 | ano |
| 13 | pokoj | 37,3 | 21 | ano |

S podporou výpočtového programu *Stabilita* lze sledovat průběh teplot vnitřního vzduchu v jednotlivých místnostech, povrchové teploty, potřebné tepelné výkony a spotřebu energie během referenčního roku v posuzovaném objektu. Nejvyšší dosažená teplota vnitřního vzduchu v letním období v objektu činila 27,4 °C. Tato teplota může mít nepříznivý vliv na tepelnou pohodu člověka. Tomuto jevu lze zabránit racionálním uspořádáním stavebních konstrukcí tvořící obálku budovy, které by bylo možné optimalizovat z hlediska použitých stávk.

Celková součtová energie na vytápění z výpočtu programem *Stabilita* činila 11224 kWh/rok. Dle průkazu energetické náročnosti budovy byla zjištěna roční spotřeba energie 18463 kWh/rok. Rozdíl spotřeb energie tedy činí 7262 kWh/rok. Může se zdát, že jde o značnou nepřesnost, ale tento rozdíl je zapříčiněn hlavně kvůli tomu, že průkaz energetické náročnosti budovy zahrnuje do roční spotřeby energie i energii spotřebovanou na ohřev teplé vody a ostatní energie. Dále průkaz nezohledňuje tepelně akumulční vlastnosti materiálů tvořící obálku budovy a vnitřní konstrukce.

Odhady o spotřebě energií podle energetického štítku obálky budovy nelze nijak porovnat s výsledky pořízené výpočetním programem *Stabilita*, protože výstupem EŠOB je pouze průměrná hodnota součinitele prostupu tepla, který pro posuzovaný objekt nabývá hodnoty $U_{em} = 0,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

8. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval problematikou energetické náročnosti budovy, která je uspořádána principem tepelného systému, popsal jsem postupy hodnocení tepelně izolačních vlastností obálky budovy a sestavil jsem Průkaz energetické náročnosti budovy (PENB) a Energetický štítek obálky budovy (EŠOB). Dále jsem předložil postup výpočtu pro stanovení energetické náročnosti budovy pomocí simulačního programu.

Energetický štítek obálky budovy hodnotí stavbu pouze podle průměrného součinitele prostupu tepla. Průkaz energetické náročnosti budovy počítá se spotřebou veškerých energií pro vytápění, chlazení, ohřev teplé vody a pro pohon podpůrných systémů jako tepelného čerpadla. Pro posouzení budovy z hlediska energetické náročnosti se ukazuje příznivé použití simulační výpočet v rámci referenčního roku, kterým se lze nejtěsněji přiblížit skutečným hodnotám spotřeby energie. Bere totiž budovu jako tepelný systém místností, mezi kterými může proudit tepelný tok s vazbou do venkovního prostředí. Díky tomuto prostředku získáváme ucelenější představu o chování objektu v průběhu celého referenčního roku, jelikož zohledňuje jak tepelně akumuláční, tak i tepelně izolační vlastnosti materiálů použitých v konstrukcích. Z tohoto prostředku získáváme údaje o průbězích vnitřního vzduchu v jednotlivých místnostech, údaje o povrchových teplotách, potřebné tepelné výkony pro vytápění i součtový údaj o spotřebě energie během referenčního roku. Podle průběhů vnitřních teplot v průběhu referenčního roku můžeme stavební objekt hodnotit z hlediska tepelné stability v letním a zimním období. Na tepelnou stabilitu jednotlivých konstrukcí, která tvoří stavební objekt, má vliv tepelná akumulace jednotlivých použitých staviv. Pokud je míra tepelné akumulace dostatečná, může konstrukce předat vnitřnímu vzduchu v místnostech naakumulované teplo zpět, čehož lze racionálně využívat například při střídání denních a nočních teplotních podmínek. Tato vlastnost se také projevuje při přerušení dodávky tepla nebo při intenzivním větrání.

Pro výsledné energetické vlastnosti budovy nejsou důležité pouze použité konstrukční a izolační materiály, ale také orientace a umístění objektu v terénu a pasivní tepelné zisky.

V současné době můžeme pozorovat oživení tradičních tepelných izolantů, jako je například sláma. Sláma by se mohla do budoucna stát plnohodnotným stavebním materiálem. V některých zemích světa se přírodní vláknité materiály začínají používat pro výstavbu zejména rodinných domů. V současné době je ovšem stále nejpoužívanější tepelnou izolací pěnový polystyren s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi.

9. Použité podklady a literatura

- [1] Zákon o hospodaření energií č. 406/2000 Sb., Praha 2000
- [2] ČSN 73 0540-2:2011, Tepelná ochrana budov, část 2: Požadavky na stavební konstrukce, ÚNMZ Praha 2011
- [3] Davies, Morris, G., *Building Heat Transfer*, John Wiley 2004
- [4] ŘEHÁNEK, J. *Tepelná akumulace budov*. Praha: ČKAIT, 2002. ISBN 8086364593
- [5] Zákon o hospodaření energií č. 406/2000 Sb., Praha 2000
- [6] ČSN 73 0540-3:2005, Tepelná ochrana budov, část 3: Návrhové hodnoty veličin, ÚNMZ Praha 2005
- [7] ŠŤASTNÍK, S.; STEUER, R., *Fyzika stavebních látek Modul M02 Příklady a výpočetní postupy*, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2006
- [8] ELIÁŠ, Filip. Výpočtové posuzování energetické náročnosti budovy jako tepelného systému [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2016 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/62690>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Stanislav Šťastník.
- [9] <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelna-akumulace-a-teplotni-setrvacnost-u-drevost/>, verze květen 2017
- [10] http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html, verze květen 2017
- [11] <http://www.heluz.cz/cs/vyrobek/heluz-family-50-2in1-brousena-1>, verze květen 2017
- [12] http://wienerberger.cz/produkty/porotherm-44-tprofi?wb_condition=ProductType:1366225107229;wb_cz_POR-BuildingPart:1366225204964#collapse-collapse1366232729722, verze květen 2017

[13] <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>, verze květen 2017

[14] <http://www.izolace-vakuova.cz/vacupor-nt-b2-s>, verze květen 2017

10. Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled výpočtových hodnot tepelné vodivosti některých materiálů λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
(ρ – objemová hmotnost, e – hodnoty platné pro vnější konstrukce, i – pro vnitřní konstrukce)

Tab. 2: Vnější návrhové teploty pro vybrané lokality podle

Tab. 3: Vybrané normové hodnoty součinitele prostupu tepla U_N

Tab. 4: Hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla $U_{em,N}$

Tab. 5: Klasifikační třídy prostupu tepla

Tab. 6: Bilance tepelných toků i -tého vnitřního prostoru

Tab. 7: Přehled členů tepelné bilance místnosti vycházející z Crank-Nicolsonova principu

Tab. 8: Přehled tepelně akumulčních vlastností vybraných materiálů obvodových konstrukcí

Tab. 9: Charakteristika budov s odlišnou spotřebou tepla na vytápění

Tab. 10: Základní požadavky na energeticky nulové budovy

Tab. 11: Přehled součinitelů tepelné vodivosti dalších materiálů

Tab. 12: Přehled základních fyzikálních vlastností EPS bílého vzhledu

Tab. 13: Přehled základních fyzikálních vlastností EPS s koloidním grafitem

Tab. 14: Základní fyzikální vlastnosti XPS

Tab. 15: Přehled geometrických charakteristik posuzované budovy

Tab. 16: Měrná tepelná ztráta a součinitel prostupu tepla, část - 1

Tab. 17: Hodnoty měrné tepelné ztráty a součinitele prostupu tepla, část - 2

Tab. 18: Technické systémy – vytápění

Tab. 19: Technické systémy – příprava teplé vody TV

Tab. 20: Technické systémy – osvětlení

Tab. 21: Přehled o dílčích dodávaných energiích

Tab. 22: Zdroj energie umístěný v budově, na budově nebo pomocných objektech

Tab.23: Rozdělení dílčích dodaných energií, celkové primární energie a neobnovitelné primární energie podle energonositelů

Tab. 24: Požadavek na celkovou dodanou energii

Tab. 25: Požadavek na neobnovitelnou primární energii

Tab. 26: Primární energie hodnocené budovy

Tab. 27: Přehled požadavků na teplotní stav jednotlivých místností v posuzovaném objektu

11. Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma tepelných toků při sálení skrz stavební konstrukci

Obr. 2: Schéma umístění systémové hranice budovy

Obr 3: Příklad energetického štítku obálky budovy

Obr. 4: Schéma uvažovaných tepelných toků v budově

Obr. 5: Schémata nejčastěji používaných metod pro řešení parciální diferenciální rovnice metodou konečných diferencí

Obr. 6: Schéma evolučního principu řešení parciální diferenciální rovnice Crank Nicolsonovou metodou

Obr. 7: Schéma uspořádání dílčích tepelných toků v budově

Obr. 8: Vzhled broušené cihly HELUZ FAMILY 50 2in1

Obr. 9: Fotografie broušené cihly Porotherm 44 T Profi

Obr. 10: Vzhled desky XPS

Obr. 11: Vyobrazení bloku EPS grafitový

Obr. 12 Vzhled desky EPS bílý

Obr. 13: Fotografie desek vakuové izolace VACUPOR NT-B2-S

Obr. 14: Výkres půdorysu 1.NP vybraného objektu

Obr. 15: Půdorysné uspořádání podkroví vybraného objektu

Obr. 16: Schéma vybraného objektu v řezu

Obr. 17: Energetický štítek obálky budovy posuzované budovy

Obr. 18: Průkaz energetické náročnosti posuzované budovy, část 1

Obr. 19: Průkaz energetické náročnosti posuzované budovy, část 2

Obr. 20: Grafické vyobrazení teplot vnitřního vzduchu v místnostech, povrchových teplot, tepelných výkonů a spotřeby energie během roku v posuzovaném objektu

12. Seznam symbolů

| | | |
|------------|--|--|
| Λ | tepelná vodivost | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| T | teplota | $^{\circ}\text{C}$ |
| N | normála | m |
| P | objemová hmotnost | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| q_k | hustota tepelného toku prouděním | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| α_k | součinitel přestupu tepla při proudění | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| t_1, t_2 | teplota vzduchu a povrchu konstrukce | $^{\circ}\text{C}$ |
| c, n | konstanty stanovené experimentálně | - |
| Nu | Nusseltovo číslo | - |
| Gr | Grashofovo číslo | - |
| Pr | Prandtlovo číslo | - |
| Re | Reynoldsovo číslo | - |
| α_k | součinitel přestupu tepla při nuceném proudění | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| v | rychlost proudění | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |

| | | |
|--------------|--|--------------------------------|
| h | délka obtékané plochy | m |
| Q_0 | celková dopadající energie na těleso | J |
| Q_A | část energie pohlcená tělesem | J |
| Q_R | část energie odražená tělesem | J |
| Q_T | část energie procházející tělesem | J |
| R | odrazivost | - |
| A | pohltivost | - |
| T | propustnost | - |
| λ_m | vlnová délka | m |
| C_o | součinitel sálání dokonale černého tělesa | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ |
| Q_{12} | sálavý tok z tělesa 1 na těleso 2 | W |
| Q_{21} | sálavý tok z tělesa 2 na těleso 1 | W |
| U_j | součinitel prostupu tepla j -té konstrukce | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| R_j | tepelný odpor j -té konstrukce | $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| $U_{em,N}$ | požadovaná hodnota součinitele prostupu | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| $U_{N,20}$ | požadované hodnoty součinitel prostupu tepla | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| $U_{rec,20}$ | doporučené hodnoty součinitel prostupu tepla | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| $U_{pas,20}$ | doporučené hodnoty pro pasivní budovy součinitel prostupu tepla | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| H_{Tj} | měrná tepelná ztráta j -té konstrukce | $W \cdot K^{-1}$ |
| A/V | Objemový faktor tvaru budovy | m^2/m^3 |
| CI | klasifikační ukazatel | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| C | plošná tepelná kapacita | $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| c | měrná tepelná kapacita | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| μ | faktor difúzního odporu | - |
| H_T | Měrná ztráta prostupem tepla | W/K |

13. Seznam zkratk

| | |
|------|--|
| ČSN | Označení českých technických norem |
| TV | Teplá voda |
| EPS | Pěnový polystyren |
| XPS | Extrudovaný polystyren |
| EN | Evropská norma |
| ISO | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| PENB | Průkaz energetické náročnosti budovy |
| 1.NP | První nadzemní podlaží |
| 2.NP | Druhé nadzemní podlaží |
| EŠOB | Energetický štítek obálky budovy |