

## JAK FUNGUJÍ TEPELNÉ IZOLACE – A KDY DOKONALE

*THERMAL INSULATION MATERIALS – HOW DO THEY WORK, HOW TO MAKE THEM TO PERFORM BEST*

Jan Hollan<sup>1</sup>

### Abstract

Thermal insulation is to reduce the 3 ways of heat transfer: radiation, conduction and convection. Insulating materials are foam or fibre types containing as much volume of tiny voids as possible and still holding its form or resisting external loads. Two less obvious processes limit insulating performance: radiation (if the foam cell walls are not opaque at wavelengths over 4  $\mu\text{m}$ ) and convection (if the voids are connected). Radiation transfer is damped by increasing the mass/volume ratio of the foam, or better by adding an absorbing/reflecting component (C or Al, making the foam grey). Convection is minimised by making the pores very small (slowing down the flow by friction), by reducing temperature difference or by increasing the ratio *loop length / pressure difference*, reducing the driving force. This is done by dividing the porous insulating layer into several sub-layers, by vapour-permeable barriers like paper or cardboard. This way, the Nusselt number (ratio of real heat flow to that without convection) of insulating layers made of coarse, but cheap and climate-friendly materials like straw can be reduced from 3 or 2 down to 1.1. Three existing implementations to achieve passive house standard are described: one on a flat roof and two on brick walls.

### Keywords

conduction, radiation, convection, convection loops, multi-layer insulation, modified Rayleigh number, Nusselt number, natural fibrous insulation materials, air permeability,

## 1 Úvod

Na přírodní materiály coby stavební izolace se dosud mnozí dívají s nedůvěrou. Na druhé straně, pro izolování svých těl je odjakživa používáme běžně, před den oblečení, v noci víceméně vysvěcení v postelích. O tom, že tlustá peřina izoluje velmi dobře, stěží kdo pochybuje. Natož o tom, že teplokrevné živočichy chrání před chladem jejich srst či peří. Vždycky jde o vrstvy vláken, a převážnou část jejich objemu tvoří vzduch.

I záměrné tepelné izolování obydlí má v některých regionech svou tradici. Největší asi tam, kde se domy v našem slova smyslu vůbec nestaví. Vůbec nejlépe tepelně izolovaná tradiční obydlí bývají jurty kryté filcem. Filc bývá z ovčí vlny, ale může být i z jaků a snad i jiných zvířat. Pro samotnou konstrukci jurty by stačila jen jedna filcová vrstva, ale v zimě se jich používá až osm, v celkové tloušťce kolem dvaceti centimetrů (a tedy hodnotou  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Takovou tepelnou izolaci má jen mizivé procento českých obydlí...

Jinou tepelnou izolaci používali dále na severu: sníh, navršený na konstrukci z kamení, hlíny, velrybích kostí a mrožích kůží, nebo (na západě Grónska a v Kanadě) rovnou jako konstrukční materiál. Kompaktní sníh izoluje alespoň dvakrát lépe než plné cihly, třiceticentimetrová vrstva propouští tedy asi  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (iglú může mít jen poloviční tloušťku stěn, ale také půlmetrovou). Někdy může sníh izolovat i lépe než dřevo, není-li příliš hutný. Samozřejmě, teplota stěn uvnitř nemůže převýšit bod mrazu, a tak se v některých případech dovnitř zavěšovala vrstva kožešin. Takové iglú už jeho obyvatelé vlastními těly a lampami na tulení olej vyhřáli na teploty i přes deset stupňů.

Jinde se dočasné přibytky se izolovaly také rašelinou.

V našich zemích tepelné izolace nebyvaly základní součástí domů, jakžtakž izolující byly jen sruby z hodně tlustých kmenů (dřevo izoluje aspoň čtyřikrát lépe než cihly). Dost dobrou tepelnou izolaci ale mívaly venkovské domy přes zimu: totiž půdu zaplněnou slámou a senem. Teplota tak utíkalo jen skrze zdi a podlahu, strop býval krásně teplý. Vykližené půdy dnešních domů znamenají ohromnou ztrátu někdejšího komfortu.

## 2 ČÍM VLÁKNA, VLOČKY A STĚBLA IZOLUJÍ

Zamysleme se nad tím, jak vlastně různé izolační vrstvy snižují únik tepla z těl či domů nebo naopak přítok tepla z horkého prostředí. Dělají to dvěma způsoby. Jednak brání proudění vzduchu kolem plochy, která nemá být ochlazována či ohřívána, a jednak brání průchodu záření. Někdy je podstatnější to, jindy ono.

Ohřev zářením je zásadní v případě přímého oslunění. Zářivé ochlazování je dominantní v noci za jasného nebe a bezvětří. Taková obloha je totiž asi o dvacet stupňů chladnější než pozemské okolí: je-li venku v noci na nule a je jasno, temeno bezvlasé hlavy s pokožkou teplou 25 stupňů do nebe vydává měrný výkon dvě stě wattů na metr čtvereční (naštěstí je temeno hlavy menší a kromě toho nechá náš organismus pokožku dle potřeby vystydnout na nižší teplotu, navíc kdo nemá vlasy, vezme si čepici).

---

<sup>1</sup> Jan Hollan, RNDr, VUT v Brně, FAST, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 602 00 Brno, hollan (na) ped.muni.cz

Prostupu slunečního záření brání lépe tmavé vrstvy, vůči dlouhovlnnému záření, které vyzařujeme my sami, se ale jako velmi tmavá (pohltivá) chovají veškerá přírodní vlákna.

V izolační vrstvě, kterou se záření těžko prodírá, se v optimálním případě vzduch nepohybuje a většina tepelného toku pak probíhá srážkami molekul vzduchu, padá tedy na vrub tepelné vodivosti vzduchu. K tomu se přidává vedení vláknů (ta jsou tak pětkrát vodivější) a záření od vlákna ke vláknu. K vodivosti samotného vzduchu oba jevy přidají třetinu až polovinu.

Tok tepla je nepřímo úměrný tloušťce izolační vrstvy. A ovšem přímo úměrný rozdílu teplot, velikosti izolované plochy a vlastní tepelné vodivosti materiálu, která se označuje většinou písmenem lambda. Pro všechny izolační materiály, přírodní i tovární, přibližně platí  $\lambda = 0,04 \text{ W/(m.K)}$ ; odchylky nepřevyšují dvacet procent (jen nanočásticové velmi drahé materiály izolují dvakrát lépe, ve vakuových panelech dokonce pětkrát lépe).

Jinak je to ovšem, když izolační vrstvou vzduch proudí, ať již samovolně (konvekci, teplejší směrem vzhůru, chladnější dolů) nebo vlivem proudění okolního vzduchu. Proto ve větru nebo na kole ohromně pomůže, když na svetr přidáme sebetenčí, ale hodně neprodyšnou větrovku. A proto mají zvířata vnější vrstvu srsti či peří co možná hustou a spojitou (pod bývají vlákna co možná drobná, aby skuliny mezi nimi byly malinké a proudění vzduchu hodně brzděno).

U vláknitých, prodyšných stavebních izolací je také zásadní, aby do nich vůbec nepronikaly poryvy větru. Vezme-li klasický případ slámy či sena na půdě, pomáhá malá prodyšnost střechy, dále lze pomoci, když přes vrstvu slámy přetáhneme málo prodyšnou textilií. Ještě méně prodyšný, a přitom pro páru výborně propustný je papír.

I za bezvětří ale vzduch izolační vrstvou na půdě proudí, je-li dostatečně tlustá, zespodu vyhřívaná a venku je mráz. Metrová vrstva slámy, tak nakonec ve velkém mraze neizoluje lépe než patnáct centimetrů pilin... To proto, že sláma je z izolačních materiálů ten nejprodyšnější, složený z nejtlustších vláken (stébel) s podobně širokými skulinami mezi vlákny. Konvekce se dá přibrzdit výše uvedeným zakrytím izolační vrstvy shora, aby proudění nemělo nahoře „zkrat“ – volnou cestu bez nutnosti se prodírat mezi vlákny. Jde-li o velmi tenkou vrstvu, jen tak dvanáct centimetrů silnou, dokáže takové zakrytí úplně zabránit proudění uvnitř vrstvy. U tlustších vrstev mu ale nezabrání, a proto u nich izolační vlastnosti nerostou úměrně tloušťce, jak by měly. Alespoň ne za mrazů, kdy se v nich konvekce určitě rozvine.

Naštěstí existuje velmi snadné řešení: tlustou vrstvu rozdělit málo prodyšnými přepážkami na několik vrstev tenčích. Na každé je pak jen zlomkový spád teplot a konvekce se ani v mraze nerozběhne. U slaměné vrstvy celkové tloušťky čtyři decimetry stačí dělení na dvě poloviční vrstvy, u tloušťky 1,2 m stačí vrstvy tři. Pokud není jisté, že se podaří všechny stejně silné, je lépe jedno dělení přidat. Není to drahé, stačí na to libovolný papír, např. rozložené staré noviny s mírnými přesahy.

### 3 NA PODLAZE PŮDY

Máte-li půdu hodně vysokou, můžete použít tři vrstvy balíků slámy (po 0,4 m) oddělené papírem a shora překryté lepenkou. Tu lze přitížit např. deskami, ale i hlínou nebo pískem, aby ji nepozvedával vítr. Táž vrstva zvýší ohnivzdornost izolace. Je možné použít i dlaždice nebo původní cihly půdní podlahy, které místo pod slámou můžou být na ní. Pod takovou důkladnou vrstvou tepelné izolace je nutné dát novou souvislou polyetylenovou fólii, jako vzduchotěsnou vrstvu i parozábranu. Měrná tepelná propustnost stropu pak bude menší než čtyři setiny wattu na metr čtvereční. Bude-li venku mínus dvacet, strop vychladne nejvýše o tři desetiny stupně oproti vzduchu v místnosti...

Nemáte-li slámy nebo místa tak moc, dobrý komfort poskytnete i vrstva půlmetrová. Tu lze snadno vyskládat z rozebraných balíků – dají se z nich odlupovat vrstvy, které zůstávají poměrně dobře stlačené. Má to i výhodu, že bude stejnorodější – původní balíky jsou totiž velmi nedokonalé hranoly a důkladné docpávání škvír mezi nimi zabere dost času (výše uvedené úvahy o počtu vrstev rozdělených papírem jsou založené na tom, že vzduch nemá nikde cestu, kudy by se mu proudilo snadněji). Půlmetrovou vrstvu doporučuji sestavit ze tří částí, starých novin či jiného papíru nebo odpadní lepenky určitě není škoda. Nakonec bude vrstva mít nějakých osm setin wattu na metr čtvereční a kelvin, též uspokojivý výsledek. Výhoda takové rozprostřené slámy je i v tom, že stačí odskládat tvrdé zakrytí, prostřít, a získáme pohodlné lože třeba pro letní hosty...

Co se samotné tepelné izolace týká, jsou veškeré přírodní materiály pro instalaci v několika konvektivně oddělených vodorovných vrstvách rovnocenné. Sláma se na půdě dobře uplatní tím, že její vrstva může být dost tuhá, pochůzná. Je možné ji použít jen na poslední vrstvu nebo dvě a pod ní mít např. hobliny.

### 4 IZOLACE ZDÍ

Balíky slámy se stále častěji používají do zdí jako materiál výplňový, ale i konstrukční. Zejména ty obří, s minimálním rozměrem asi 0,8 m, jsou dostatečně tuhé a staví se z nich velmi pevné zdi. Z jižní strany takové domy mají velkorysé prosklení (viz např. <http://www.strohhaus.com>). Ze slámy se staví pěkně a rychle. Jen s omítáním je potřeba při použití malých balíků počkat, až se po zatížení krovem a střechou zdi sesednou (balíky musí být pro tento účel hodně slisované, s objemovou hmotností alespoň devadesát kilogramů na metr krychlový). Užívají-li se balíky jako výplň dřevěné konstrukce nebo izolační „přizdívka“, stačí, když mají jen  $70 \text{ kg/m}^3$ . Balíky se většinou kladou tak, že

provazy, kterými jsou svázány, zůstávají uvnitř zdi a stěbla jsou orientována kolmo ke zdi. Ve směru podél stébel jsou totiž balíky nejpevnější a mají stálé rozměry. Zeď se pak dá pěkně srovnat (mechanicky, např. palicí, a následně dle potřeby řetězovou pilou) a omítnout. Takové masivní slaměné stavby fungují výborně a jsou prakticky nekonečně trvanlivé (řada jich stojí už sto let). Izolují lépe než iglú a jurty. A nesrovnatelně lépe než běžné stavby z cihel či kamene.

Přesto, při vědomí že skutečně dobré domy má člověk po většinu roku vytopit svým vlastním metabolismem, stavbám ze slaměných balíků chybí něco k dokonalosti. Problém je v onom v samovolném tepelném proudění vzduchu, konvekci. Na rozdíl od vodorovných izolací na půdě, kdy se při malém spádu teploty a malé izolační tloušťce konvekce vůbec nerozběhne, ve svislých nebo šikmých izolacích (ve krovech) probíhá vždy. Je-li venku mínus deset, zhorší konvekce izolační vlastnosti slaměné izolace na polovinu.

Dokonalá náprava neexistuje, ale uspokojivá ano: rozdělit izolaci na více vrstev. Je-li izolace tlustá 0,4 m, stačí její rozdělení na tři vrstvy, lepší je ale rozdělení na čtyři vrstvy. Ve zdech je to obtížnější než na půdě, nelze tam prostě cokoliv rozvrstvit a občas překrýt papírem. Na druhé straně, z obřích balíků se dobře oddělují čtverce tloušťky tak jeden decimetr, které lze ke zdi přikládat a prokládat papírem. I malé balíky tak lze „loupat“, jen ty pláty mívají proměnlivější tloušťku. Tak jsme nainstalovali tři až čtyři slaměné vrstvy na jednu zeď budovy seminárního centra v Hostětíně, do připravených svislých laťových roštů v rozteči 80 cm. Alternativou by mohlo být postupovat ve vodorovných řadách, přičemž by se každá hotová řada silně přitlačila ke zdi dvěma vodorovnými latěmi s drátěnými táhly (jedno táhlo šikmo nahoru, druhé šikmo dolů, v rozteči odpovídající šířce plátů odlupovaných z balíků).

Vytváření kvalitní slaměné vrstvy na svislé zdi je dost pracné. To proto, že vrstva má být stejnorodá, bez málo stlačených míst. Kdekoliv jsou mezi stěbly velké mezery, tam vzduch proudí mnohem snáze, a taky se už velmi uplatňuje zářivý tepelný tok (už při sedmimilimetrových mezerách je stejně velký jako vedení tepla vzduchem). Vytvořit kvalitní vícevrstvou izolaci prokládanou papírem nedá méně práce než vytvořit jakžtakž homogenní, ale fyzikálně přesto nedokonalou přízdívku z malých balíků (ty totiž nejsou pravoúhlé, ale spíš válcovité, a vznikající dutiny nezbyvá než dopávat volnou slámou – tak jsme v Hostětíně izolovali o několik let dříve zeď skladu moštárny, při kladení balíků stěbly na výšku).

Alternativou umožňující pohodlné vytvoření homogenních vrstev je instalovat slámu do dřevěných ráků na zemi a teprve ty vztyčit ke zdi. Zvláště snadné je to tehdy, když se na podlaze v montážní hale sestavují celé zdi budoucího domu. Tak to bylo v případě slavného domu firmy Natur und Lehm, který stojí v obci Tattendorf jižně od Vídně – v jejich případě ale do konstrukce našlapali celé balíky a ne vrstvy slámy prokládané papírem (o problému s konvekci nevěděli; kdyby ano, snadno mohli postup upravit, protože sláma je beztak schovaná za šikmým deskovým bedněním, tuhost balíků nebyla podstatná). V hale na dřevoslaměné zdi nanesli i tlusté hliněné omítky a po jejich vyschnutí je po železnici přivezli na staveniště. Dům byl pak sestaven velmi rychle.

Pokud je dům už hotový a zeď se má izolovat dodatečně, je možné moduly s dřevěnou konstrukcí použít také. Konstrukce stačí subtilní, laťová, a jednotlivé moduly mohou být malé, řekněme o šířce necelého metru a výšce dva metry, s tloušťkou dle možnosti od tří do šesti decimetrů. Zadní strana modulů může být nejsnáze tvořena polyetylenovou fólií, čímž vznikne pružná, mírně vypouklá plocha, která dobře přilehne ke zdi. Takové moduly nemusejí vážit více než šedesát kilogramů, takže s nimi mohou manipulovat dva lidé. Na zeď se modul připevní dvěma šikmými táhly z drátu vedoucího od spodní vnější hrany modulu ke hmoždinkám, které jsou o kus výše. Aby byl blok dobře přitlačený ke zdi v celé své výšce, hodí se přidat ještě další šikmá táhla v horní polovině modulu. Sklon táhel volíme podle toho, jak je modul těžký – má-li přes šedesát kilogramů, mohou být táhla odkloněná ode zdi jen o třicet stupňů (modul je pak na zeď tlačěn polovinou své váhy), u lehkých modulů může být vhodný sklon 45 stupňů. U takových, nebudou-li dost zatíženy omítkou, se navíc hodí použít i táhla opačná, směřující šikmo dolů (jednak pro důkladné přitlačení modulu ke zdi, aby za ním nebyly skuliny, a jednak aby jej nenadzvedl vítr svým sáním).

I když zadní strana bloků bude tvořena polyetylenovou fólií, je vhodné jinou, třeba jen tenkou fólií zavěsit předem na zeď. Ta vytvoří řádově vyšší bariéru pro průnik páry z interiéru do izolační vrstvy mezi bloky, než bude bariéra tvořená omítkou. Fólie zavěšená na zdi a přitlačená izolací není ale vzduchotěsná, protože je v ní mnoho otvorů v místě kotvení drátěných táhel. Vzduchotěsnost musí zajišťovat omítky nebo jiné vrstvy v interiéru (např. OSB desky s lepenými spoji a ještě přelepované trvale lepivými páskami).

Pro pohodlné připeňování bloků na zeď je vhodné ponechávat mezi nimi mezery široké jeden decimetr. Ty se pak vyplní třemi či více vrstvami slámy rovnou na zdi (je to jednodušší než vyplňování širokých polí, protože šířka jednotlivých vrstev nepřesahuje jejich hloubku, a ony tak během instalace nemají tendenci odpadávat). Místo papíru lze slámu v mezerách rozdělovat pruhy lepenky, které se zapnou o oba moduly.

Do takových laťových dřevěných ráků není nutné klást zrovna slámu. Stejně dobré je seno, hobliny, piliny, peří – jakékoliv lehké přírodní materiály. Jejich jediným účelem je pohlcovat záření a brzdit proudění vzduchu. U peří, sena i pilin by mělo vždycky stačit dělit čtyřdecimetrovou vrstvu na tři díly: jemnější vlákna a jemnější skuliny mezi nimi kladou proudění vzduchu větší odpor než hrubá textura slámy. Při užití sypkých materiálů se mezery mezi moduly vyplňují tak, že se lepenkou ohradí patřičné dutiny a pak se zasypou.

Výhoda slámy oproti ostatním materiálům je v tom, že i když má stébla podél zdi, dá se nahazovat omítkou. Pak je vhodné mít přední část modulu hodně rovinnou a stlačenou, toho lze docílit instalováním alespoň osmi vodorovných latí (po dvou decimetrech), které slámu přitlačují a udržují zhruba v rovině. Čelní latě, jsou-li dost široké, mohou být tlusté pouhý jeden centimetr, ušetří se tak na objemu omítky. Nevyčnívá-li hodně slaměných stébel svými konci směrem ven, bude ale asi potřeba i obvyklá rákosová nebo drátěná rohož.

Pokud se má izolace obkládat, přední vodorovné latě nejsou potřeba. Stačí celou izolační soustavu překrýt spojitě papírem (proti větru a konvekci) a přitlačit obkladem, čímž se i zatlačí vypouklé polštáře izolační vrstvy v každém modulu. Obklad může být různě složitý: v Hostětíně na papírovou vrstvu přišlo šikmé bednění ob desku, pak mírně prodýšná textilie proti rozstříku dešťových kapek i poryvům větru (proudění vzduchu klade velmi vysoký odpor) a teprve pak vodorovný obklad z nenapuštěných modřínových desek. Není-li pod izolační vrstvou dosti souvislá polyetylenová fólie, nesmí být obklad ani mírně vzduchotěsný (coulová dřevěná vrstva je totiž větší bariérou pro vodní páru než cihlová zed').

## 5 SLÁMA VE ZDECH MÁ TRADICI

Sláma jako stavební materiál se ve skutečnosti užívá už dlouho. Ve stěnách ve formě provazců omazaných hlinou nebo jako přídavek do hliněných cihel, na střeše coby krytina. Příležitostně lze u nás na venkově najít sto let staré vnější slaměné izolační vrstvy např. na chlévech (všimneme si jich jen tam, kde je opadaná omítka).

Ve formě balíků se sláma začala používat coby nosný materiál (na nosnosti se podílí omítky) v devatenáctém století krátce po zavedení lisů v Nebrasce a jinde v USA. Nezávisle se z balíků stavěly domy coby východisko z nouze na Ukrajině a nespíš i jinde. Dnes je ve vyspělé Evropě nových domů se slaměnou izolací už stovky. Nekladou-li se na ně nejvyšší nároky (tj. standardu pasivního domu s  $U \leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), je taková technologie uspokojivá, poskytuje i při teplotách kolem nuly (v zimě 2007 vlastně nejnižších...)  $U$  kolem  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

## 6 ... ALE ZEJMÉNA BUDOUCNOST

Na druhé straně, když už sláma může izolovat stejně dobře jako polystyrén téže tloušťky, pokud v ni je nulová nebo zanedbatelná konvekce, proč to nevyužít? Pak může půlmetrové souvrství ze tří až čtyř vrstev oddělených papírem propouštět méně než  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , nezávisle na tom, je li deset nad nulou nebo dvacet pod nulou. Dům, který o víkend vytopíte, do toho dalšího nestačí vystydnout...

Vrstvené izolace z přírodních materiálů, pokud se aplikují šikovným způsobem, mají jednu velkou přednost: nemá smysl šetřit na jejich tloušťce. Už proto, že jsou levné – krychlový metr by neměl stát více než sto dvě stě korun, přírodní materiály stojí alespoň pětkrát víc. Slámy či přebytečného sena (stačí, ba lepší je seno nekvalitní, žluté, jen ne plesnivě) rozhodně není škoda, naopak: v budově je pak na desítky či stovky let uskladněn uhlík, místo aby zoxidovaný unikl do ovzduší. A pracnost izolování zdi nebo instalování izolační výplně do dřevěné konstrukce jen málo roste s tloušťkou izolace. Ve vhodné konstruovaných souvrstvích lze uplatnit i materiály sypké, typicky hobliny a piliny – opět je to lepší použití než s nimi zatopit, natož je nechat zetlít. Vrstvené izolace mají proti kompaktním balíkům slámy samozřejmě i nevýhody, a to malou vlastní pevnost, přinejmenším v tahu, a malou vlastní odolnost proti požáru. Pevnost v tahu musí poskytovat dřevěná konstrukce, odolnost proti šíření ohně pak souvislý dřevěný obklad nebo minerální vrstva. Na rozdíl od konstrukcí z omítnutých balíků, která prošly na výbornou důkladnými rakouskými a americkými požárními testy, pro vrstvené izolace testy ještě nebyly provedeny – nastává čas to napravit. Bát se ale vrstvených izolací určitě nemusíme, porovnáme-li to s praxí, když na půdě ležela sláma či seno volně... ostatně nějaká opuštěná hospodářství, kde nespoteřované seno leží na půdě už celá desetiletí, znáte možná i sami.

Oproti balíkům aplikovaným na staveništi mají moduly s dřevěnou konstrukcí ještě jednu výhodu: lze je připravit rychle a kvalitně ve vodorovné poloze v suchu pod střechem. Na stavbě se pak dají rychle instalovat i v proměnlivém počasí, aniž izolační materiál promokne. Udržet jej v objemu suchý je naprostá nezbytnost (orosení nebo milimetr srážek na povrchu nevádí, pokud má povrch možnost zase na větru či na slunci uschnout, vzpomeňme ostatně na stohy slámy venku – zapaří se a rozkládají nejprve uvnitř).

Jedinou hrozbou pro přírodní izolační materiály je totiž vlhkost. Zopakujme proto, že do izolační vrstvy nesmí pronikat žádný vzduch z interiéru, v zimě by z něj v chladné části izolace kondenzovala vodní pára. Dalším zdrojem páry je difuze přes vzduchotěsnou vrstvu; tam platí známé pravidlo, že na exteriérové straně izolace musí být odpor proti difuzi o řád menší než na interiérové straně. U dodatečně izolovaných zdí je to snadné, stačí běžné polyetylenová fólie pod izolací. Náročným případem je izolace neprovětrávané vodorovné střechy, na které stává voda (třeba ve vrstvě hlíny). Pod tepelnou izolací musí být zvláště důkladná bariéra proti difuzi, s kovovou vrstvou a tzv. ekvivalentní difúzní tloušťkou alespoň několika set metrů. Tlustá izolační vrstva musí být na boku difúzně otevřená do venkovního vzduchu. Tak jsme to provedli na ubytovací části hostětínského centra (izolace střechy má dvě vrstvy slámy oddělené papírem v celkové tloušťce čtyři decimetry, sláma nese celé zatížení hlinou a sněhem). Kovová parozábrana a boční difúzní otevřenost je také potřeba, když sláma tvoří podlahu budovy – tak to lze provést, když je podlahu umístěna nad terénem a má pod sebou provívaný prostor. Pro takovou dolní izolaci stačí užít nerozdělené balíky, protože nedochází ke konvekci (teplý vzduch se drží nahoře, chladný dole).

Ještě k obvyklému dotazu: „a co myší“? Ty umí bydlet ve všech izolačních materiálech, ale lépe se jim daří v polystyrénu a minerální vatě, protože vyhloubené chodbičky v nich vydrží. V přírodních pružných materiálech ne, okolní stěbla či vlákna každý průřez zase zaplní. A slámou ani nekvalitním senem, tedy vlastně celulózou, se žádná zvířátka život neumějí. Je-li takový materiál celou dobu suchý a po instalování do stavby je uzavřen minerální vrstvou či obkladem, vydrží tam navěky. Materiály, které by mohly být poškozeny, jsou jen bílkovinné zvířecí produkty, vlna a peří. Pokud v nich ale nejsou larvy molů (ty lze zničit tepelnou sterilizací umístěním na hodinu do sauny, na rošt nebo v textilním pytli, aby se materiál prohřál konvekcí) a pokud se zabudují do vzduchotěsného systému, také mohou vydržet neomezeně. (Jinak se pro stavební účely vlna doplňuje pyrethroidy tak, že v ní larvy nepřežívají, pak už ale nestojí krychlový metr dvě stě korun... vhodné použití má v malých tloušťkách na interiérové straně konstrukce.)

## 7 KONVEKCE KVANTITATIVNĚ

Vliv proudění na tepelný tok se vyjadřuje tzv. Nusseltovým číslem. Je-li rovno jedné, je to případ, kdy se proudění nijak tepelně neprojevuje, tepelný tok se realizuje jen zářením a vedením ve vzduchu a vedením ve vláknech. Je-li rovno dvěma, pak to znamená, že proudění snížilo tepelný odpor izolační vrstvy na polovinu. Jak ukazují americká a dánská měření, a jak také vyplývá z teorie, to je právě případ slaměných balíků v situaci, kdy je venku mráz.

Porézní izolační materiály proudění potlačují, kladou mu odpor. Odpor kladený prouděním lze charakterizovat jediným geometrickým parametrem, permeabilitou, která má rozměr plochy a značí se obvykle  $K$ . Porézní tepelně izolační materiály ji mají v rozmezí  $10^{-7}$  až  $10^{-10}$  metru čtverečního, lépe se to pamatuje v milimetrech čtverečních, kdy je to od jedné desetiny do jedné desetitisícin. Nebo ještě lépe, jako odmocnina z této hodnoty, lze si ji představit jako jakýsi průměr kanálků, to je pak od tří desetin milimetru (balíky slámy) do setiny milimetru.

Abychom získali Nusseltovo číslo  $Nu$ , vyjdeme z modifikovaného *Rayleighova čísla*  $Ra_m$  pro porézní vrstvy.  $Ra_m$  je úměrné výšce porézní dutiny  $H$ , teplotnímu rozdílu  $T$  a permeabilitě  $K$ . Pro obvyklou zimní teplotu v dutině a obvyklé materiály s  $\lambda = 0,04$  W/(m.K) je to kolem

$$Ra_m = 0,7 (H / 1 \text{ dm}) (T / 10 \text{ K}) (K / 0,01 \text{ mm}^2)$$

**Vodorovné homogenní vrstvy**, i když v nich teplota klesá směrem vzhůru, zůstávají bez konvekce, pokud platí, že  $Ra_m < 40$  (nebo  $< 25$ , je-li vrstva nahoře otevřená, což by ale být neměla už kvůli možným poryvům větru). Nad tímto limitem platí [15]

$$Nu = 1 + 0,04 (Ra_m - 40).$$

**Ve svislých vrstvách**, jimiž jde tepelný tok příčně, se konvekce odehrává vždy. Ale Nusseltovo číslo zůstává pod 1,1 je-li  $Ra_m$  nižší než 10.

Má-li konvektivní buňka čtvercový průřez (to může být případ stěn z balíků slámy, vlivem nehomogenity na rozhraní balíků) pak zhruba platí (dle [1]), že

$$\begin{array}{ll} Nu = 1 + Ra_m/100 & \text{pro } Ra_m < 15, \\ Nu = 0,8 + Ra_m/36 & \text{pro } 15 < Ra_m < 40, \\ Nu = 1 + Ra_m/45 & \text{pro } 40 < Ra_m < 100. \end{array}$$

Jinými slovy,  $Ra_m = 20$  zhoršuje izolační vlastnosti o třetinu,  $Ra_m = 90$  třikrát.

Jak řečeno, sláma má  $K = 0,1 \text{ mm}^2$  – to je hodně. Taková hodnota vyplývá z publikovaných měření [např. 6, str. 43] i z měření, která jsem prováděl pomocí dlouhého polyetylenového vaku, dávajícího přetlak asi 1 Pa (měřené balíky měly objemovou hmotnost kolem  $75 \text{ kg/m}^3$ ). K tomu, že musí být řádově takto velká, lze k ní dojít ale i úvahou: reprezentuje totiž průřez typického póru. Kdyby byl čtvercový, pak by jeho hrana byla asi třetina milimetru, což je hodnota, která odpovídá stlačené vrstvě málo uspořádaných slaměných stébel. Sláma je ze všech izolačních materiálů nejhrubší, až na dřevěné štěpky (které už izolují zřetelně hůře), u všech ostatních vláknitých či vložkových materiálů, nemají-li objemové hmotnosti zvláště nízké, jsou póry tenčí.

Snížit modifikované Rayleighovo číslo lze buď snížením permeability, tedy přidáním dostatečně jemnozrnné frakce, nebo rozdělením vrstvy na menší buňky.

**U vodorovné vrstvy nad vytápěnými prostory** stačí rozdělení na dvě poloviny (např. papírem, lepenkou nebo jakoukoliv starou fólií se spoustou dírek).  $Ra_m$  se sníží čtyřikrát. Dvě vrstvy balíků (celkové výšky 80 cm) by měly bez rozdělení  $Ra_m$  kolem 175, je-li teplotní spád 30 K. Po oddělení vrstev přepážkou, která proudění klade velký odpor, se  $Ra_m$  zmenší na 45. Tak lze dosáhnout hodnoty  $U$  kolem  $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Oproti tomu, pouhá jedna vodorovná vrstva standardních balíků má v takových podmínkách  $U$  velkou až  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ , a dvě neoddělené vrstvy asi stěží méně než 0,2!

**Ve zdi** to není tak jednoduché. Vodorovné oddělení balíků nemůže pomoci (možná může i vadit). 80cm dvojitá vrstva se svislou bariérou proti konvekcí uprostřed dává sice hodnotu  $U$  pod 0,1 (tak je izolovaný tepelný zásobník moštárny a seminárního centra v Hostětíně), ale většina lidí dává přednost tenčím stěnám.

Při užití nasypávané izolace lze dutinu dělit vodorovně do vrstviček, jejichž výška činí nejvýše pětinu tloušťky dutiny, pak zůstává konvektivní příspěvek k vodivosti pod deseti procenty i při materiálu s permeabilitou  $0,1 \text{ mm}^2$ .

Svislé bariéry proti konvekci jsou ale tepelně účinnější, ve vrstvě tloušťky 40 cm stačí vždy pouhé dvě.  $R_{a_m}$  (počítané z vodorovné tloušťky vzniklých komor místo z jejich svislého rozměru) klesá totiž devětkrát, z mrzutých 90 na velmi přijatelných 10.

## 8 O VYJADŘOVÁNÍ ODPORU PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ

Odpor proti proudění tekutin je při malých rychlostech konstantou, podobně jako v Ohmově zákoně atd. Zde je to Darcyho zákon, [http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy's_law).

Objem protečený za jednotku času,  $Q$  je

$$Q = -(K.A/\mu) \times (P_b - P_a)/L,$$

kde  $K$  je [permeabilita](#) (jakýsi efektivní průřez pórů),  $A$  plocha, kterou tekutina protéká,  $\mu$  je [viskozita](#) tekutiny (jednotkou je pascal sekunda),  $P_b$  je tlak před porézní vrstvou a  $P_a$  za ní, a  $L$  je protékaná délka (tedy tloušťka vrstvy).

Pro konkrétní tekutinu, pro nás tedy vzduch, se místo  $K$  udává kombinace této materiálové konstanty a viskozity vzduchu:  $K/\mu$  (součinitel objemové průvzdušnosti) nebo jeho převrácená hodnota  $\mu/K$ . Viskozita vzduchu pro stavební aplikace činí 18E-6 Pa.s (čili osmnáct mikropascalsekund).

Je-li tedy např. specifický odpor materiálu proti proudění vzduchu udáván na 11 kPa.s/m<sup>2</sup>, je to asi šedesátkrát více než pro slámu (ta má tak 180 Pa.s/m<sup>2</sup>). Jinak, permeabilita takového materiálu je asi 0,0016 mm<sup>2</sup>, aneb typický efektivní průměr pórů asi čtyři setiny milimetru. Izolační vrstvy takového materiálu už jsou vůči samovolné konvekci imunní, přesto je potřeba je chránit před poryvy větru (tam nejde o zlomky paskalů, ale až o desítky).

## 9 VÍCE O MĚŘENÍ PERMEABILITY

Organické izolační materiály objemové hmotnosti kolem sta kilogramů na metr krychlový, nebýt konvekce, izolují všechny skvěle. Měřit jejich vlastnosti v tenkých vrstvách není potřeba, jsou jistě dobré. Jediné, co může být potřeba měřit, je odpor kladený proudění vzduchu.

Na měření vyvinul aparaturu doktorand Ing. Tomáš Znajda. V disertaci [2] uvádí hodnoty pro dvoje hobliny a jednu, asi lehkou, čedičovou vlnu. Při jedné hoblině volně naspaných mu vyšla permeabilita jen dvakrát nižší než u slámy, při jiných nebo více stlačených už to bylo vesměs šestkrát nižší. U zkoumané minerální vaty to bylo až patnáctkrát nižší, tedy odpovídající pórům jen necelou desetinu milimetru velkým.

Měření lze ale provést i velmi jednoduše, pomocí dlouhého polyetylénového pytle či rourové fólie.

Vzorek se pro měření může natlačit (s potřebnou objemovou hmotností) do nějaké roury (např. válcové PET láhve s uřezanými konci), může být i obdélníková. Pokud je to vzorek nesytký, pak se místo toho omotá tenkou fólií.

Ústí pytle se opáše kolem připraveného vzorku. Na tenoučkou fólii se položí papír, tak aby na ni tlačil dobře definovanou plochou. Dokud není fólie na krajích vydutá, aby na ní papír visel, je tlak dán plošnou hmotností papíru. Pytel se postupně nafoukne tak, že se z druhé strany lehce připojí jiný pytel, může být tlustší, do kterého se předem nabere vzduch.

Při měření lze vzduch přetlačovat do jiného pytle z téže tenoučké fólie. Je pak možné změřit dost přesně objem vytlačeného vzduchu, např. přesátím do kanystru, ze kterého postupně vypouštíme vodu.

Měří se čas, za který se nějaký objem vzduchu protlačí přes vzorek. Vzorek může být dlouhý, abychom čas prodloužili. Přetlak by měl být ideálně nejvýše jeden pascal na jeden metr délky vzorku, to se ale stěží podaří, proto může být i o řád větší (i o dva řády, u málo prodyšných materiálů – jen aby jsou rychlosti vzduchu ve vzorku byla stále v řádu nejvýše centimetrů za sekundu).

Testoval jsem tak vlnu, seno, piliny. Nacpané seno (125 kg/m<sup>3</sup>) mělo prodyšnost (tj. permeabilitu) dostatečně malou, setinu milimetru čtverečního. Mírně stlačené hobliny ještě o řád nižší. Jsou to plnohodnotné izolační materiály. Seno lze nacpat méně a dostatečně zlepšit hoblinami, při menší objemové hmotnosti.

## 10 O ŘEZÁNÍ A LEPENÍ BALÍKŮ

O potřebě dělit tlusté slaměné tepelné izolace do více vrstev napříč tepelného toku, pro potlačení konvekce, píše od jara roku 2005 [7, 13, 14]. Na podzim téhož roku jsem o tom přednášel na veletrhu Aquatherm [4], s důrazem na možnost vytvořit ve slaměných balících minerální přepážkami pomocí injektáže. Přímou přednášce navrhoval někdo z účastníků řezání balíků a jejich opětovné spojování minerálním pojivem. Pak mi to v dopise připomněl Martin Mizur: „*Nebo vložit balík do třídičkové formy, rozřezat jej na tři díly skrz mezery ve formě a zpětně spojit pomocí sádry nebo jílu.*“

Řezání a spojování maltou možné je, ale nejde to dost rychle a je u toho dost hluku, pokud se to dělá dlouhou řetězovou pilou. Možná by to šlo pásovou pilou, to by mohlo být snesitelné a snad i rychlejší. Kdyby to pak byly přesné hranoly, bylo by to zajímavé. Ostatně by mohly být rovnou i oboustranně omítnuté, takže by se z nich stavělo jako

z velkých tvárníc. Pokud by minerální přepážky i omítka byly hliněné, mohlo by jít o tvárnice přijatelné ceny i povahy. Mohlo by to být i méně pracné než stloukání a vyplňování izolačních bloků.

## 11 O VODOROVNÉM VRSTVENÍ

Z obřích balíků by mělo být možné stavět i s vodorovným oddělováním vrstev (vrstvy asi 12 cm, šířka zdi 80 cm). Aby po sobě vrstvy neklouzaly, asi by byla potřebná vlnitá lepenka (místo recyklace znovupoužití..., lze jí získat dostatek ve sběrných dvorech) namočená oboustranně do hliněné malty. Po zaschnutí (to může být rychlé, sama lepenka vodu odsaje) by propojení vrstev mohlo být dostatečné. Možná by tak šlo stavět i z vrstev odlupovaných z malých balíků; přesně nařezaná lepenka by nastavila i přesné rozměry zdi. Pro dostatečné potlačení vlivu konvekce by se ovšem i u takové tenčí zdi musela dodržet podmínka, že vrstvičky jsou aspoň pětikrát tenčí než celá izolace.

Poznatek, že slámu lze z obřích hranolových balíků odlupovat po vrstvách, jsem našel v diplomní práci ing. Františka Špundy [3].

Více o daném nápadu píšu v příspěvku do mailinglistu ekodum, [Vrstvy slámy z obřích balíků](#) [16]. Izolování slámou se týká i několik předchozích a následujících dopisů (viz [seřazení dle data](#)). Ohledně požární odolnosti je relevantní ten o tři dopisy výš, od Miloše Kincela (dutina ohrazená sádrovláknitou deskou by měla být posuzována bez ohledu na to, je-li v ní sláma nebo vzduch) [17]. Sádrovláknité desky kladou difuzi odpor jen asi 13× větší než vzduch, takže jejich použití na vnější straně (jako souvislé vrstvy bránící konvekci i vlivu porывů větru, co možná vzduchotěsné, pod dřevěným obkladem) je dobře možné.

Po realizaci v Hostětíně jsem napsal stručný [komentář](#) [19] (též jako reakci na [příspěvek Martina Papeže](#) [18], jehož rodina měla na realizaci lví podíl). Před konferencí Pasivní domy 2006 pak vznikl [komentovaný soubor snímků ze stavby Centra](#) [20]. Text pro sborník konference i prezentace na konferenci viz [21].

---

*Poznámka o původnosti textu: kapitoly 1 až 6 byly napsány pro publikaci EKObývanie [22], kde v mírně zkrácené podobě vyšly. Text byl pak zpřístupněn i v adresáři <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/slama>. Obsah kapitol 7 až 11 je tam v podobě jednotlivých html souborů též. Jako celek shrnující stav poznání v oboru vlivu konvekce na porézní tepelné izolace se všechny části objevují v jediné práci dohromady poprvé, doplněné soupisem literatury (ta předtím byla uvedena nanejvýš v jednotlivých příspěvcích do elektronických konferencí).*

## Literatura

- [1] BEJAN, Adrian. *Convection Heat Transfer*. New York John Wiley & Sons 1995 (623 pages), p 556. ISBN 0-471-57972-6
- [2] ZNAJDA, Tomáš. *Modelování průvzdušnosti stavebními materiály a konstrukcemi s ohledem na energetickou náročnost stavebních konstrukcí*. Disertace, VUT v Brně, FAST. 2005.
- [3] ŠPUNDA, František. *Energetická koncepce rodinného domu se zimní zahradou*. Diplomní práce, MLZU v Brně. 2006. Viz <http://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?id=6475;zalozka=7>; posudek oponenta je k dispozici též textově jako <http://amper.ped.muni.cz/jenik/letters/public/msg00237.html>
- [4] HOLLAN, J.: *Fyzikální vlastnosti izolace ze slaměných balíků a jejich úprava pro pasivní domy*. Sborník semináře „Praktické zkušenosti z výstavby pasivních domů“ Praha 23. 11. 2005. Též [http://amper.ped.muni.cz/jenik/passiv/slama/aquath\\_05.htm](http://amper.ped.muni.cz/jenik/passiv/slama/aquath_05.htm)
- [5] KELLER, Lars. *Danish results on testing SB walls*. <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/2004-September/000901.html> – hyperlinks to the parts of the study by Byggeforskninginstitut, Denmark.
- [6] MUNCH-ANDERSEN, Jørgen & ANDERSEN, Birte Møller. *Halmhuse: Udformning og materialeegenskaber*. By og Byg resultater 033, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, Denmark, 2004. ISBN 87-563-1196-6. <http://www.sbi.dk/byggeteknik/konstruktioner/serlige-konstruktioner/halmhuse/halmhuse>
- [7] HOLLAN, Jan. *Measured heat flux through a real wall/ceiling*. A message to an e-mail conference, <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01019.html>. 2005.
- [8] DALMEIER, Rene. *(on heat transfer through plastered SB walls)*. A message to an e-mail conference, <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01021.html>. 2005.
- [9] GRUBER, Herbert. *(On lambda value of straw)*. A message to an e-mail conference, <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01023.html> and facsimiles of the  $\lambda$ -value certificate, <http://www.baubiologie.at/download/zertifikate/lambda.html>. 2005. See also <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01030.html>

- [10] SCHARMER, Dirk. *Hygrothermal behaviour of straw bales – Update of German test findings*. 2005, a message to an e-mail conference. <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/2005-March/001034.html>
- [11] DALMEIER, Rene. *Realistic SB lambda values*. 2005, a message to an e-mail conference. <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/2005-March/001036.html>
- [12] BIGLAND-PRITCHARD, Mark. (*On 7 field tests of strawbale insulating properties*). 2005, a message to an e-mail conference. <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01035.html>
- [13] HOLLAN, Jan. (*formulating the convection idea*) 2005, a message to an e-mail conference. <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01037.html>
- [14] HOLLAN, Jan. *Convection in porous thermal insulation layers*. 2005, <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01053.html>, continues as <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01068.html> and <http://amper.ped.muni.cz/strawbale/a/msg01069.html>
- [15] SERKITJIS, Mihail, HAGENTOFT, Carl-Eric. The Influence of Natural Convection on the Heat Transfer in an Air Filled Porous Medium Bounded by an Air Layer. *The Nordic Journal of Building Physics (Acta physica aedificiorum)*, <http://www.byv.kth.se/avd/byte/bphys/>. 1998. ISSN 1402-5728 . Abstract see [http://www.byv.kth.se/avd/byte/bphys/view\\_article.asp?param=ID&data=8](http://www.byv.kth.se/avd/byte/bphys/view_article.asp?param=ID&data=8), the paper [http://www.byv.kth.se/avd/byte/bphys/pdf/art\\_0298.pdf](http://www.byv.kth.se/avd/byte/bphys/pdf/art_0298.pdf)
- [16] HOLLAN, Jan. *Vrstvy slámy z obřích balíků*. Dopis do e-mailové konference <http://mailman.fsv.cvut.cz/lists/ekodum/2006/msg00101.html> Viz též časově následující položky seznamu <http://mailman.fsv.cvut.cz/lists/ekodum/2006/maillist.html#00101>.
- [17] KINCEL, Miloš. *Požární konstrukce se slámou*. Dopis do e-mailové konference, <http://mailman.fsv.cvut.cz/lists/ekodum/2006/msg00104.html>
- [18] PAPEŽ, Martin. *Balíky slámy – svépomocí*. Dopis do e-mailové konference, <http://mailman.fsv.cvut.cz/lists/ekodum/2006/msg00133.html>
- [19] HOLLAN, Jan. *Vrstvy slámy z obřích balíků*. Dopis do e-mailové konference <http://mailman.fsv.cvut.cz/lists/ekodum/2006/msg00139.html>
- [20] HOLLAN, Jan. *Komentovaný soubor snímků ze stavby Centra v Hostětín*. 2006, [http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin\\_centrum/images/](http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin_centrum/images/)
- [21] GAILLYOVÁ, Yvonna, STOLEK, Ivo, HOLLAN, Jan. *Centrum v Hostětíně postaveno – jak vlastně?* Sborník konference Pasivní domy 2006, Centrum pasivního domu, Brno, str. 150-156. Online jako Pas\_domy06.\* v adresáři [http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin\\_centrum/](http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin_centrum/)
- [22] HOLLAN, Jan. Přírodní materiály jako tepelná izolace: sláma a nejen ta. *EKO bývanie*, str. 56-63. Media/ST, Žilina, 2007. <http://www.ekobyvanie.sk>
- [23] GAILLYOVÁ, Yvonna, HOLLAN, Jan, REINBERG, Georg W., STOLEK, Ivo. Seminární centrum Hostětín. Konference Energeticky pasivny dom, Bratislava, 2007. [http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin\\_centrum/epd2007\\_host.pdf](http://amper.ped.muni.cz/pasiv/hostetin_centrum/epd2007_host.pdf)

#### Recenzoval

RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D., MU v Brně, pedagogická fakulta, katedra fyziky, Poříčí 7, Brno, svobodova (na) ped.muni.cz