

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Ing. František Kulhánek, CSc

**Komplexní analýza zateplovacího systému
z lehkých sendvičových panelů**

**Complex Analysis of Light Sandwich Panels External
Thermo–Insulation Contact System (ETICS)**

Summary

Energy conservation is one of most important aims of today's world. And consumption of energy in building is one from most important parts of world energy balance. In last decades requirements on thermo-insulation quality of building structures rised very dynamically in last decades.

Habilitation work is focused on utilization of light sandwich insulating panels for additional insulation of buildings – dwelling and civil houses of panel structural systems. Maximal attention is pointed to the crucial zone of design – to the zone of vapour diffusion and condensation.

In the first part of work the historical development of basic standard thermo-insulation requirements is described and the light insulating panels are characterised. In the following part methodology of building structures evaluation from the vapour diffusion (including diffusion by joins) and condensation point of view is solved.

The crucial part of habilitation work is description and interpretation of experimental evaluation of vapour diffusion by thermo-insulation panels joins [18 test samples were tested] and mainly detailed numerical analyse of diffusion properties of insulated structure. Totaly 18 versions of structural solution of insulated structures were evaluated by the procedure of one-dimensional heat and moisture transport.

For the better understanding of behaviour of insulating system in the case of breakdown of sealed panel join another set of 15 calculations of two-dimensional temperature and diffusion fields was fulfilled. This solution, unsupported by standards regulations demonstrated, that in situation of total collapse of sealed join the evaluated system has high level of safety and quantity of condensated vapour is either neutral or insignificant.

The end of the work is reserved for findings and suggestions of structural design philosophy and realisation of additional thermo-insulation system, technological questions, fire safety of construction and brief economy evaluation.

The habilitation work demonstrated, that conceptual project of external additional thermo-insulation system from light sandwich panels is real both technical and technological. Next step of the system development will be experimental building, affording opportunity to test new technology in situ.

Souhrn

Úspory energie jsou jedním z prioritních úkolů současného světa. Spotřeba energie, spjatá s provozem budov činí jednu z nejvýznamnějších položek světové energetické bilance. V nárocích na tepelně izolační kvality stavebních konstrukcí proběhl v posledních desetiletích velmi dynamický vývoj – jeho stručný přehled je i součástí habilitační práce.

Habilitační práce je zaměřena na využití lehkých sendvičových izolačních panelů pro dodatečné zateplení stavebních objektů - především bytových a občanských staveb panelových konstrukčních systémů. Práce je směřována do klíčové oblasti návrhu - do oblasti difuze a kondenzace vodní páry v zateplené konstrukci.

V úvodu práce je sledován historický vývoj základních normových tepelně technických požadavků a jsou stručně charakterizovány lehké sendvičové panely. V další části je popsána metodika hodnocení stavebních konstrukcí z hlediska difuze a kondenzace vodní páry včetně teorie spárové difuze.

Klíčovou partií práce je jednak popis a vyhodnocení experimentálního ověření difuze vodní páry stykem zateplovacího panelu (bylo změřeno celkem 18 zkušebních vzorků) a především podrobné výpočtové hodnocení difuzních vlastností skladby zateplených konstrukcí. V rámci tohoto hodnocení bylo metodikou pro výpočet jednorozměrného šíření tepla numericky posouzeno celkem 18 variant konstrukčního řešení zateplení. Pro přesnější poznání chování zateplovacího systému v případě kolapsu tmelového spoje vnitřních plášťových desek zateplovacích prvků byl proveden soubor dalších 15 výpočtů, hodnotících dvourozměrné teplotní a difuzní pole všech klíčových variant zateplených konstrukcí. Tento postup, který doposud nemá oporu v normových ustanoveních, prokázal, že i v případě totální netěsnosti spoje vnitřních plášťových prvků má navrhovaný zateplovací systém vysokou míru bezpečnosti a že potenciálně zkondenzovaná množství jsou nulová nebo zcela zanedbatelná.

Závěr práce, který je věnován poznatkům a připomínkám ke koncepci konstrukčního návrhu a realizaci zateplovacího systému, se zabývá mimo jiné i technologickými postupy při realizaci zateplení, požární odolností nového zateplovacího systému a jeho stručným ekonomickým hodnocením.

Práce prokázala, že koncepční návrh zateplovacího systému z lehkých sendvičových panelů je technicky reálný a že lze i reálně uvažovat o projektu experimentu, který by umožnil odzkoušet novou technologii zateplení in situ.

Klíčová slova:

Provozní energetická náročnost budov, vnější zateplovací systém, lehký sendvičový panel, difuze a kondenzace vodní páry, spárová difuze, dvojrozměrné teplotní a vlhkostní pole

Keywords

Energy efficiency of buildings, external thermo-insulated contact system, light sandwich panel, wapor diffusion and condensation, diffusion by joins, two dimensional thermal and humidity field

České vysoké učení technické v Praze

Název: Komplexní analýza zateplovacího systému z lehkých
sendvičových panelů

Autor: Ing. František Kulhánek, CSc

Počet stran: 22

Náklad: 150 výtisků

© František Kulhánek

ISBN

OBSAH

1.	Úvod.....	6
2.	Charakteristika lehkých sendvičových panelů.....	8
3.	Spárová difuze.....	9
4.	Experimentální ověření difuze vodní páry spárou lehkých sendvičových panelů.....	10
5.	Podrobné výpočtové hodnocení difuzních vlastností zateplené konstrukce.....	12
5.1	Varianty řešení těsnění styčné spáry mezi zateplovacími panely.....	13
5.2	Výpočtové ověření tepelně technických vlastností zateplené konstrukce.....	14
5.2.1	Výpočtový model s uvážením jednorozměrného šíření tepla a vlhkosti.....	14
5.2.2	Výpočtový model s uvážením dvojrozměrného šíření tepla a vlhkosti.....	16
6.	Závěr.....	18
	Literatura.....	20
	Odborný životopis.....	21

1 ÚVOD

Úspory energie jsou jedním z témat, které má i z celosvětového hlediska nejvyšší prioritu. Souvisejí s nimi současné změny životního prostředí, a tak termíny jako globální oteplování, skleníkový efekt, kyselý déšť a podobně jsou známy i laikům, kteří se touto problematikou vůbec nezabývají. S úsporami energie souvisí i otázka jaderné energetiky, pomalu se blížící vyčerpání standardních zdrojů energie i využití nových netradičních a obnovitelných energetických zdrojů. Otázky dostupnosti energetických zdrojů jsou často i v pozadí různě se vyvíjejících mezinárodně politických vztahů a konfliktů.

Snaha o dosažení energetických úspor je patrná jak ve světové ekonomice, od hledání energeticky nenáročných výrobních technologií pro světové a národní programy energetických úspor, tak i v jednotlivých rodinách a domácnostech – stačí uvést jen používání energeticky úsporných zdrojů světla a energetické štítkování domácích elektrických spotřebičů.

Spotřeba energie, spjatá s výstavbou a provozem budov tvoří jednu ze zásadních položek celkové světové spotřeby energie. Menší část z ní tvoří energie, spotřebovaná pro výrobu stavebních hmot a konstrukčních prvků a veškerá energie potřebná pro vybudování objektu, jeho údržbu a likvidaci po skončení jeho životnosti – zde je zahrnuta i recyklace stavebních materiálů a konstrukcí. Těmito specifickými otázkami se stále více zabývá vědní obor, související s hodnocením budov z hlediska jejich životního cyklu spadající do oblasti známé pod názvem udržitelný rozvoj.

Spotřeba energie pro provoz budov má, především u budov bytového a občanského charakteru, svoji podstatnou složku v energiích, spotřebovávaných pro vytápění, případně i chlazení objektů a přípravu teplé vody. Její hlavní složkou je pak energie, nezbytná k vytápění objektů, s níž velmi úzce souvisí i problematika stavebně energetických vlastností budov.

V této oblasti proběhl v posledních desetiletích velmi dynamický vývoj. Požadavky na izolační vlastnosti stavebních konstrukcí se v posledních desetiletích zvýšily o několik set procent a demonstrují tak trvalou snahu o úsporu energetických zdrojů i na území našeho státu. Postupně byly odbourány různé výjimky, umožňující časově omezené použití konstrukcí

s nízkou energetickou kvalitou a současný stav legislativních opatření je na takové úrovni, že na novostavby i rekonstrukce stávajících objektů jsou kladeny z hlediska energetického stejně přísné požadavky, ač ještě donedávna platily pro rekonstrukce objektů určité úlevy.

Vzhledem k charakteru a stáří objektů bytové a občanské výstavby a k množství každoročně nově budovaných objektů je zřejmé, že k dosažení podstatných úspor, spojených s provozem stavebních objektů je třeba zaměřit se nejen na objekty nové, ale především na objekty starší a staré, které byly vystavěny sice v souladu s požadavky platnými v době jejich realizace, ale z pohledu současných energetických hledisek jsou absolutně nevyhovující. U těchto objektů je třeba velmi podrobně zhodnotit, zda s ohledem na jejich stavebně technický stav a zůstatkovou životnost je účelné u nich provést komplexní zateplovací opatření, která by jejich energetickou náročnost uvedla do úrovně požadované současnými předpisy, či zda – s ohledem na krátkou dobu jejich výhledového využití – není takováto investice ekonomicky neefektivní.

Specifickou skupinou staveb jsou z tohoto pohledu panelové bytové a případně i občanské objekty. Značnou část současného bytového fondu tvoří právě panelové objekty. Úvahy o jejich nezbytné likvidaci, které se objevily počátkem devadesátých let se podařilo pomocí seriózních technických a ekonomických argumentů vyvrátit a je jasné, že právě tato skupina budov stále ještě připadá z technického i ekonomického hlediska v úvahu pro budoucí rekonstrukce a modernizace, jejichž logickou součástí musí být i opatření, vedoucí k výraznému zlepšení tepelně izolačních vlastností obalových konstrukcí a následně k podstatnému snížení jejich provozní energetické náročnosti. Proces postupného zateplování panelových objektů již probíhá, s ohledem na počet těchto objektů, kapacity stavebních firem a i na finanční možnosti majitelů jednotlivých budov lze očekávat, že období takzvané energeticky vědomé modernizace panelových objektů bude trvat ještě několik desetiletí.

I když z technického hlediska lze k zateplení obvodového pláště panelových objektů využít minimálně dva principiálně odlišné systémy, jimiž jsou kontaktní a nekontaktní vnější zateplovací systémy, v praxi se především z ekonomických důvodů využívá pouze jeden z nich – kontaktní systém. Tento systém používá zateplovacích desek z expandovaného polystyrénu, případně speciálních tuhých fasádních izolačních desek z vláknitých materiálů a vnější povrchové úpravy na bázi stěrkových omítek. Jedná se o práci s relativně malými zateplovacími prvky, kotvenými k původnímu plášti jak tmelem, tak i mechanicky pomocí talířových hmoždinek. Veškeré práce jsou ryze manuálního charakteru, bez

větší možnosti využití mechanizace a moderních stavebních technologií. Proto také kvalita výsledného díla je velmi závislá na lidském faktoru a při současné kvalifikační struktuře pracovníků v českém stavebnictví je zajištění vysoké kvality prací stále obtížnější, takže i riziko následných poruch a defektů zateplovacích systémů je stále vyšší.

Předložená habilitační práce proto demonstruje první krok ve vývoji technologicky i materiálově odlišného kontaktního zateplovacího systému – systému využívajícího lehkých izolačních sendvičových panelů, tvořených plášťovými plechy a tepelně izolačním jádrem. Sendvičové panely jsou v široké míře používány především pro výstavbu objektů halového charakteru s nosnou ocelovou konstrukcí, kde se velmi výrazně uplatňují jejich hlavní výhody: vysoká tepelně izolační schopnost, kvalitní a vysoce trvanlivé povrchové úpravy, široký sortiment struktury a barev povrchů, lehkost, snadná montáž, cenová dostupnost a schopnost běžně vyrábět panely velkých rozměrů.

Cílem zde dokumentovaného výzkumu je prověřit možnost využití lehkých sendvičových panelů z hlediska stavební tepelné techniky – především s ohledem na difuzi a kondenzaci vodní páry.

2 CHARAKTERISTIKA LEHKÝCH SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Lehké sendvičové panely jsou velkoplošné konstrukční prvky, používané v konstrukčním řešení obvodových a střešních plášťů především pro budovy občanské výstavby a objekty sportovního a průmyslového charakteru. Jejich hlavní pole využití je z konstrukčního hlediska zcela jednoznačně pro rozsáhlé budovy halového charakteru, kde lze v nejvyšší možné míře uplatnit veškeré výhody těchto konstrukčních prvků.

Konstrukce panelu je tvořena vnější a vnitřní plášťovou deskou, tzv. krycími plechy. Mezi těmito deskami je tepelně izolační jádro, které má i funkci statickou – vytváří tuhé spojovací a distanční prostředí mezi plášťovými deskami, čímž jsou splněny základní požadavky pro vznik prvku sendvičového charakteru.

Stěnové a střešní sendvičové prvky sice mají určitá konstrukční specifika, v zásadě jsou však konstruovány a vyráběny na shodném principu a v rámci jejich obecné charakteristiky je lze popisovat společně.

Jednotlivé typy stěnových panelů se mezi sebou liší především materiálem použitým pro izolační jádro panelu, vnější a vnitřní profilací, způsobem kotvení a tloušťkou, ze které plyne tepelně izolační schopnost panelu a jeho požární odolnost. Všechny vyráběné prvky umožňují jak horizontální tak i vertikální kladení.

3 SPÁROVÁ DIFUZE

Při výpočtovém hodnocení tepelně technických vlastností stavebních konstrukcí se velmi často setkáváme s konstrukčními prvky, tvořenými materiály pro vodní páru velmi málo propustnými nebo zcela nepropustnými. Tyto konstrukce bývají někdy označovány jako konstrukce s velmi vysokým nebo dokonce nekonečným difuzním odporem. Jedná se například o velkorozměrové trapezové plechy, glazované keramické obkladové desky, skleněné desky a podobně. Organickou součástí takovýchto vrstev jsou však nezbytně i spáry, kterými na rozdíl od základního materiálu vrstvy dochází k difuzi vodní páry. V technické praxi je tato skutečnost často zanedbávána a v určitých případech pak zanedbání vlivu spárové difuze může vést k výskytu velmi vážných poruch, které nepříznivě ovlivní nejen životnost stavební konstrukce, ale především její funkční způsobilost a spolehlivost. Existují však i situace, kde hodnocení konstrukce s uvažováním vlivu spárové difuze umožní použít prvek nebo konstrukci, které se bez započítání vlivu spárové difuze jeví jako zcela nevyhovující.

Problematikou difuze vodní páry stavebními konstrukcemi se zabýval F. Mrlík, který rozpracoval teorii spárové difuze a především jako první experimentálně stanovil hodnoty spárové difuzní vodivosti pro řadu nejběžněji používaných konstrukcí.

Klíčovou fyzikální veličinou pro oblast spárové difuze je tedy spárová difúzní vodivost Λ_{dl} , která pro příslušnou spáru udává difundující tok vodní páry v kg/s na jeden běžný metr spáry při rozdílu parciálních tlaků vodní páry rovném 1 Pa. Rozměr této veličiny je [s].

Difuzní tok vodní páry spárou o délce l lze pak vyčíslit ze vztahu:

$$q_p = \Lambda_{dl} * l * \Delta p_v \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1),$$

kde Λ_{dl} je spárová difúzní vodivost [s],
 Δp rozdíl parciálních tlaků vodní páry [Pa],
 l délka spáry v metrech.

Pomocí spárové difuzní vodivosti lze pak vyčíslit ekvivalentní difuzní odpor konstrukce ze vztahu:

$$Z_{p,ekv} = \frac{A}{\Lambda_{dl} * l} \quad [\text{m/s}] \quad (3.2)$$

S veličinou ekvivalentního difuzního odporu, která do plochy konstrukce zahrnuje i vliv difuzní spárové vodivosti se pak pracuje jako s běžnou hodnotou difuzního odporu, to znamená, že z ní lze vyčíslit běžné difuzní charakteristiky příslušné vrstvy, jako je buď faktor difuzního odporu μ_{ekv} nebo součinitel difuzní vodivosti materiálu vrstvy δ_{ekv} .

$$\mu_{ekv} = \frac{Z_{p,ekv}}{d * N} \quad [-] \quad (3.3)$$

$$\delta_{ekv} = \frac{d}{Z_{p,ekv}} \quad (3.4)$$

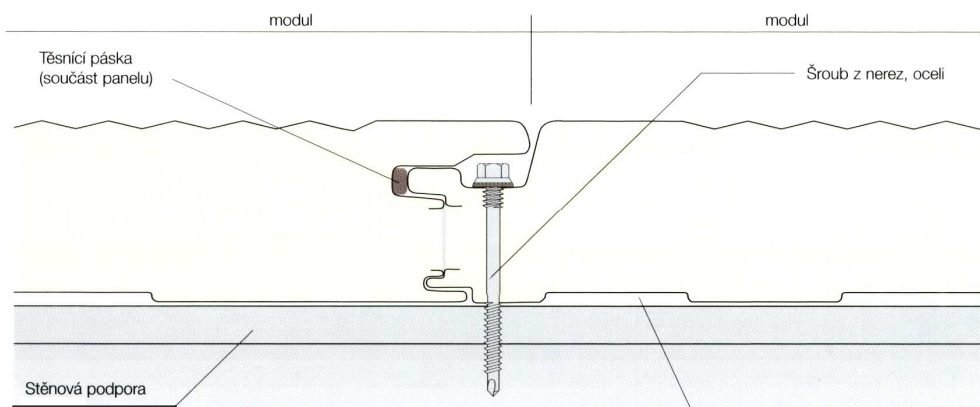
4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ DIFUZE VODNÍ PÁRY SPÁROU LEHKÝCH SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Pro exaktní zjištění průběhu difuze vodní páry zateplovacím systémem ze sendvičových zateplovacích panelů je nezbytné znát difuzní charakteristiky styků mezi panely. Vzhledem k tomu, že plášťové vrstvy panelů tvoří plech, lze důvodně předpokládat, že k difuzi vodní páry zateplovacím systémem dochází především spárami mezi jednotlivými panely a difuzní tok panely je zcela minimální či spíše nulový. Jedná se tedy o klasickou ukázkou spárové difuze, kterou lze numericky řešit na základě teorie spárové difuze popsané v předešlé kapitole. Pro realizaci těchto výpočtů je však nezbytné znát hodnotu difuzní spárové vodivosti pro příslušné konstrukční řešení styčné spáry mezi panely. Jedinou možností, jak získat přesnou hodnotu této veličiny, je realizovat experiment, vedoucí k jejímu změření.

Jedná se o vysoce specializovaný experiment, při kterém je zjišťováno množství vodní páry, které projde zkušebním vzorkem, který dělí dvě prostředí s rozdílnými tlaky vodní páry a teplotami. Jedná se o měření extrémně malých hodnot – za cca 120 hodin projde měřeným vzorkem cca 2 až 3 gramy vodní páry. K provedení experimentu je třeba speciální měřicí zařízení – jediný exemplář zkušební komory, která umožňuje provést měření v souladu s normou předepsanými postupy, vlastní CSI a.s. Praha, pracoviště Zlín. Zjištění spárové difuzní vodivosti styku lehkých

sendvičových izolačních panelů bylo proto zadáno tomuto ústavu, jehož akreditovaná laboratoř měření provedla a vydala o něm i příslušný protokol.

Cílem experimentu bylo zjistit hodnotu spárové difuzní vodivosti typického styku sendvičových zateplovacích panelů typu Kingspan. Konstrukční řešení zkoumaného styku panelu typu KS 1000 SF je patrné z obr.1.



Obr.1: Detail styku sendvičových zateplovacích panelů

Z obr.1 je zřejmé, že parotěsnost vnější části styku je zajištěna těsnícím páskem, sevřeným mezi hrany panelu. Difuzní spárová vodivost tohoto styku pak zjevně závisí na použitém těsnícím prvku, respektive na materiálu, z něhož je tento těsnící prvek zhotoven.

Z výše uvedených důvodů bylo proto rozhodnuto provést experimentální ověření difuzní spárové vodivosti spoje v několika variantních stavech, a sice:

- pro těsnící pásek z pěnového polyuretanu o tloušťce 5 mm a
- pro těsnící pásek z pěnové pryže o tloušťce 6mm.

Měření byly realizována pro stlačení těsnící pásky o:

- 50% původní tloušťky,
- 20% původní tloušťky,
- 0% původní tloušťky, to znamená v původním nestlačeném stavu.

Z každého typu těsnícího pásky bylo vyrobeno celkem 9 zkušebních vzorků a vždy 3 vzorky těsnění byly zkoušeny pro stejný přítlak. Označení vzorků pro jednotlivé zkoušky je patrné z následující tabulky:

Pořadové číslo	Materiál vzorku	Označení vzorku	Spárová difuzní vodivost $S \cdot 10^{12}$	Ekvivalentní difuzní odpor $m/s \cdot 10^{-9}$
1	Pěnový polyuretan tl. 5 mm	A	2,4001	1,4213
2		B	2,0438	1,6527
3		C	1,3604	3,2572
4	Pěnová pryž tl. 6 mm	D	13,0700	2,7506
5		E	70,2400	5,0853
6		F	42,5410	7,9551

Tab.1 : Souhrnné výsledky zkoušky

Výsledky experimentálního ověření difuzní spárové vodivosti styku lehkých sendvičových panelů byly použity jako vstupní údaje pro následující výpočtové hodnocení difuzních vlastností panelu a jednotlivých variant zateplené konstrukce.

5. PODROBNÉ VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ DIFUZNÍCH VLASTNOSTÍ ZATEPLENÉ KONSTRUKCE

Pro návrh konstrukcí s vnějším zateplovacím systémem nebo konstrukcí s vrstvami s velkým difuzním odporem na vnějším líci platí z hlediska množství zkondenzované vodní páry zpřísněná normativní kritéria. Jednoznačným důvodem tohoto požadavku je aktuální nebezpečí kondenzace vodní páry na zadním líci parotěsných vrstev.

Stejně nebezpečí vzniká i při použití lehkých sendvičových panelů, jejichž plášťové desky tvoří ocelový plech – to znamená vrstva s velmi vysokým difuzním odporem – k zateplení obvodových plášťů stávajících budov.

Vlhkostní režim takto navržených konstrukcí je proto třeba podrobit podrobné analýze, která objasní vliv všech faktorů, které do procesu vstupují, na aktuální vlhkostní stav konstrukce.

Po vyhodnocení všech v úvahu připadajících variant byl jako referenční konstrukční systém vybrán objekt typu T 08B s oběma řešeními obvodového pláště, to znamená jak před revizí tak po revizi konstrukční soustavy.

5.1. VARIANTY ŘEŠENÍ TĚSNĚNÍ STYČNÉ SPÁRY MEZI PANELY

Konstrukce lehkých sendvičových panelů v maximální možné míře respektuje pravidla, platná pro navrhování obalových stavebních konstrukcí z hlediska difuze a kondenzace vodní páry. Plášťový prvek má sice na vnějším líci ocelový plech, což je vrstva s velmi vysokým difuzním odporem, vrstva s prakticky stejným difuzním odporem je však i na vnitřním líci panelu. Prostor mezi těmito plášťovými deskami je zcela vyplněn tepelným izolantem – obvykle tuhým polyuretanem, který nejenže má potřebné vlastnosti statické, ale má i vynikající vlastnosti tepelně izolační a nízkou hodnotu nasákavosti. Jak bude prokázáno v následujících výpočtech, kondenzace vodní páry v těchto sendvičových prvcích je – za expozice v běžných okrajových podmínkách – zcela minimální.

Klíčovým místem tohoto typu obvodových panelů jsou obvykle spáry mezi jednotlivými prvky. U lehkých sendvičových obvodových panelů, které byly vybrány jako reprezentanti pro teoretické a experimentální hodnocení (jedná se o panely typu KS 1 000 SF se skrytým kotvením), se jedná vzhledem k jejich tvarovému a rozměrovému řešení především o podélnou spáru. Podíl příčných spár v zateplování konstrukcí panelových budov je vzhledem k maximální výrobní délce panelu minimální. Často dokonce může nastat situace, kdy se v zateplované stěně neobjeví styčné spáry vůbec – např. při zateplování objektu do výše pěti podlaží a vertikální poloze panelů není při zateplování štítové stěny budovy vůbec potřeba realizovat v konstrukci příčné spáry – k zateplení postačí jeden vertikálně situovaný plášťový prvek.

Příčná spára mezi panely se obvykle realizuje jako tmelená spára překrytá těsnicí lištou – řada měření prokázala, že takovýto typ spoje je prakticky zcela parotěsný.

Podélný styk panelů je těsněn na dvou úrovních – u vnitřního líce panelu je zámek plášťových desek těsněn tmelem, takže s ohledem na svoje konstrukční řešení je odůvodněně považován za parotěsný. Vnější spoj plášťových desek je těsněn pomocí těsnicího pásku, stlačeného šroubovým spojem. K těsnění se používají buď pásy z molitanu, nebo pásy pryžové. Protože se očekává prioritní využití pryžových těsnicích prvků, byl výpočet proveden pro těsnění pryžovými pásy, i když nezbytné difuzní charakteristiky molitanových těsnicích pásků, potřebné pro výpočtové hodnocení spoje, byly v rámci provedených experimentů také získány.

Těsnost vnějšího spoje sendvičových panelů jednoznačně závisí na míře stlačení těsnícího prvku ve spoji. Proto také při experimentálním ověření difuze vodní páry tímto spojem bylo uvažováno stlačení těsnícího prvku na třech úrovních:

- stlačení 0 %, to znamená volný, nedotažený spoj,
- stlačení 20%, to je ideálně dotažený spoj s patřičnou mírou těsnosti a bez nebezpečí vyvolaných deformací jednotlivých prvků ve spoji,
- stlačení 50 %, tzv. přetažený spoj, to je spoj s extrémní svěrnou silou a reálným nebezpečím deformace jednotlivých prvků spoje.

Pro základní výpočtové hodnocení bylo uvažováno s ideálním stavem spoje, to znamená s mírou stlačení 20%, při některých kontrolních výpočtech bylo uvažováno i s oběma krajními extrémy, to znamená stlačení těsnění o 0 eventuálně 50%.

Již při přípravě vstupních dat pro výpočet difuze vodní páry obvodovým pláštěm se ukázalo, že základní fyzikální princip použitého spoje je naprosto ideální: na vnitřním líci je spoje zcela parotěsný, vnější spoj je v ideálním stavu pro vodní páru dostatečně propustný a i při jeho případném postupném uvolnění až na míru stlačení 0% se celková difuzní vodivost spoje ještě zlepšší. Tvarové i konstrukční řešení spoje pak zajišťuje potřebnou vodotěsnost i odolnost spoje proti větru i při nulovém stlačení těsnícího prvku. I při maximálním stlačení těsnění na hodnotu 50% si vnější spoj panelu zachovává paropropustnost, potřebnou pro dokonalou funkci spoje. Tepelně izolační jádro panelu je uvnitř spoje stykováno na sraz a vzhledem k minimálním hodnotám tolerancí, daným použitou výrobní technologií panelů, je styk polyuretanového jádra dostatečně těsný a nevzniká tak prakticky žádný tepelný most.

5.2 VÝPOČTOVÉ OVĚŘENÍ TEPelnĚ TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ ZATEPLENÉ KONSTRUKCE

5.2.1 Výpočtový model s uvážením jednorozměrného šíření tepla a vlhkosti

Na počátku systému výpočtového hodnocení zateplené konstrukce panelového objektu konstrukční soustavy typu T 08B bylo provedeno vstupní ověření tepelně technických vlastností samostatného zateplovacího prvku, to je panelu typu KS 1000 SF. Ve výchozí variantě bylo uvažováno s ideálním fragmentem plášťového prvku, to znamená, že nebyl započten vliv spárové difuze.

Výpočet prokázal, že v konstrukci dochází ke kondenzaci vodní páry na zadním líci vnější plášťové desky, zkondenzovaná množství jsou velmi malá, max. 3 gramy na kvadrátní metr a rok. Bilance kondenzace a

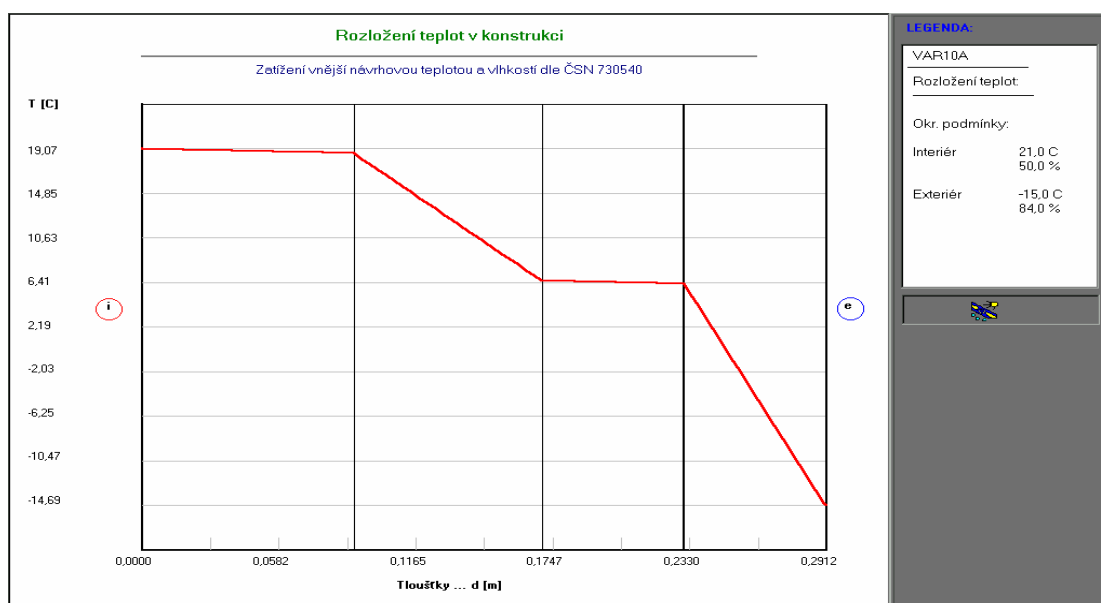
vypařování je aktivní.

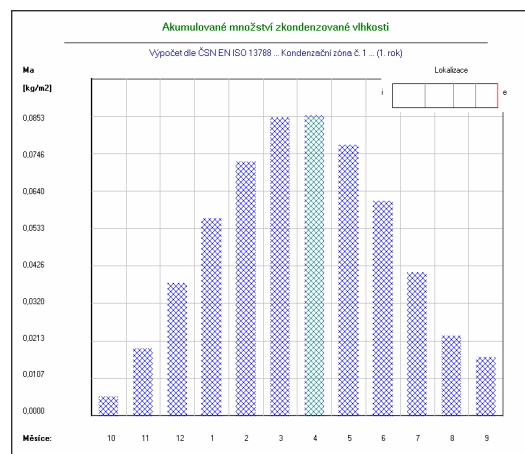
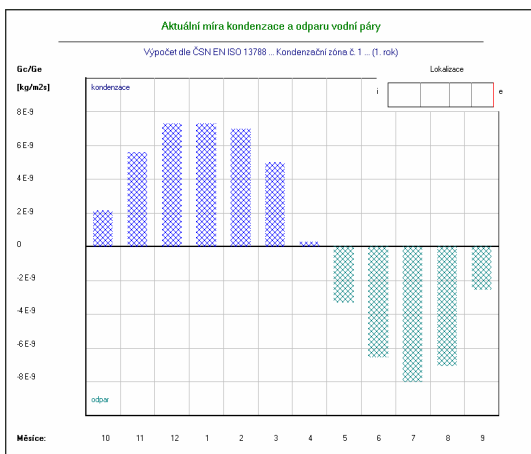
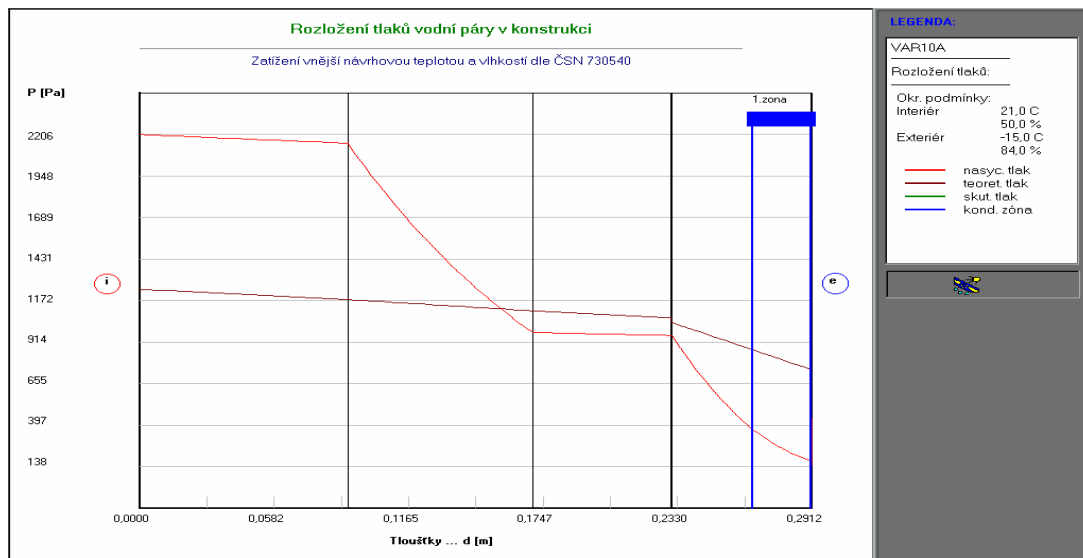
Obdobné výsledky byly získány i při hodnocení styku samostatných zateplovacích panelů při třech základních mírách stlačení pryžového těsnicího prvku. Při výpočtu s uváženým vlivem spárové difuzní propustnosti se situace ještě poněkud zlepšila a výskyt kondenzátu je v podstatě numericky nezjistitelný.

V dalších výpočtech byly vyhodnoceny varianty zateplení obvodového pláště panelového objektu konstrukční soustavy T 08B (před i po revizi) za různé míry stlačení pryžového těsnicího prvku i za extrémních hodnot teploty venkovního vzduchu včetně situace, kdy mezi zateplovacím systémem a vnějším lícem zateplované konstrukce je v důsledku nepřesnosti montáže obvodových panelů mezera o tloušťce 10 respektive 50 mm. Všechny tyto výpočty prokázaly reálnost použití navrhovaného systému, ke kondenzaci vodní páry buď vůbec nedocházelo nebo se vyskytovala ve zcela zanedbatelné míře.

Následující výpočtové hodnocení pak zkoumalo chování zateplené konstrukce v případě, že tmelová vrstva, zajišťující styk vnitřních plášťových plechů zateplovacích panelů nemá požadovanou kvalitu, ať již v důsledku technologické nekázně při montáži nebo dlouhodobé degradace tmelové výplně spáry. Výsledky výpočtu prokazují, že jakmile dojde k poklesu kvality těsnění vnitřní části styku zateplovacích panelů, stává se roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry zateplovacího prvku pasivní a konstrukce je tudíž nepoužitelná – viz obr. 2.

Celkem bylo numericky vyhodnoceno 18 konstrukčních variant zateplení.





Obr. 2: Výsledky vyhodnocení varianty 10B

5.2.2. Výpočtový model s uvažováním dvojrozměrného šíření tepla a vlhkosti

Předchozí výpočty, na jejichž základě byly vyslovena hypotéza nepříznivých důsledcích případného kolapsu tmelového uzávěru spáry na vnitřní straně zateplovacího prvku, vycházejí z jednorozměrného vedení tepla i vlhkosti. I když výpočet používá experimentálně zjištěné hodnoty difuzních vlastností těsnícího prvku, jedná se svým způsobem o výpočet zjednodušený, kdy zjevně dvojrozměrné šíření tepla a vlhkosti ve stavební konstrukci je hodnoceno metodikou, vycházející z šíření jednorozměrného.

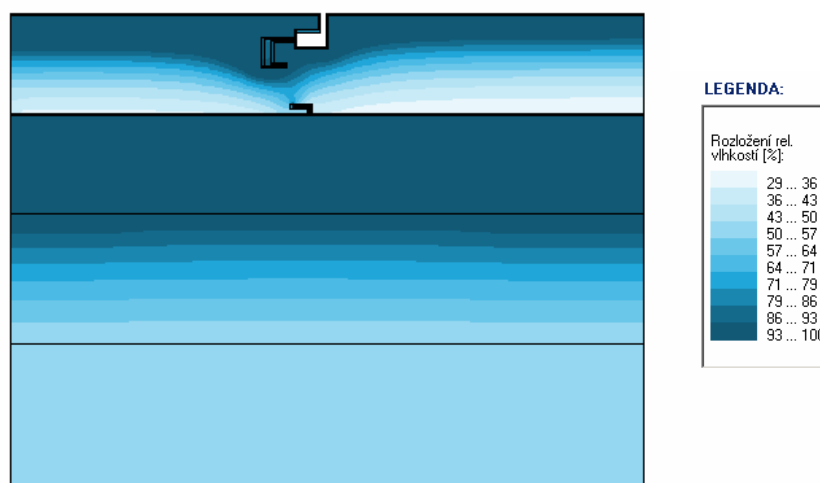
Výsledné hodnoty lze tedy považovat za údaje, které ne zcela exaktním způsobem zobrazují fyzikální děje probíhající v zateplené konstrukci. Proto byl učiněn následující pokus o přesnější numerické hodnocení difuze i kondenzace vodní páry v konstrukci, včetně vyčíslení roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry. Použitý matematický model vychází

z teorie dvourozměrného šíření tepla a vlhkosti a úloha je řešena pomocí metody konečných prvků. Použitý program AREA kvantifikuje množství kondenzátu, i když nestandardním způsobem, který neumožňuje přímé porovnání výsledků s normovými požadavky, přesto však dává poměrně přesný obraz o rozložení vlhkosti v konstrukci i roční bilanci kondenzace a vypařování a nepřímo tak vypovídá i o případné použitelnosti nebo nepoužitelnosti konstrukce. Použitá volba geometrie charakteristického výseku konstrukce umožnila získat údaje o množství zkondenzované a vypařené vodní páry, vztaženém na plošnou měrnou jednotku hodnocené konstrukce, kterou lze orientačně porovnat s normovými ukazateli.

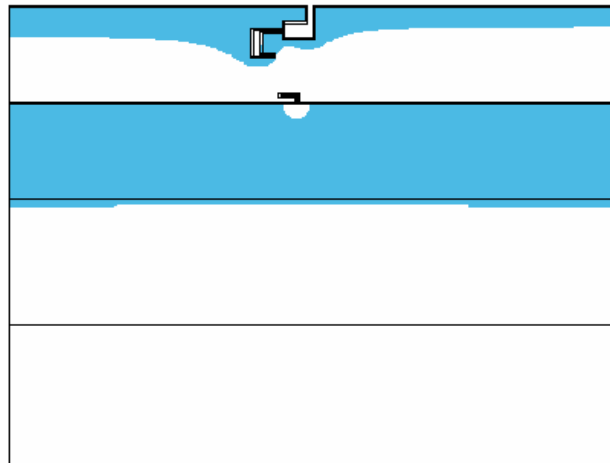
Výsledky získané tímto výpočtem lze tedy považovat za směrodatné a především principiálně přesnější než výsledky, vyčíslené z jednorozměrného výpočtového modelu. Jedná se o zcela reálné hodnoty s vysokou mírou vypovídací schopnosti.

Výpočtové vyhodnocení dvourozměrných teplotních a vlhkostních polí bylo provedeno pro 15 vybraných variant konstrukčního řešení.

Již hodnocení samostatného zateplovacího prvku prokázalo, že i při různých mírách stlačení těsnicího prvku nejenže nedochází ke kondenzaci vodní páry uvnitř zateplovacího panelu, ale navíc koncentrace vlhkosti v konstrukci nikdy nepřesahuje hodnotu 35%. U většiny ostatních hodnocených variant nedochází ke kondenzaci vodní páry buď vůbec, nebo jen ve zcela minimálním množství (0,1 gramu na čtvereční metr za rok). Nejvyšší hodnotu množství kondenzátu (5,2 gramu na čtvereční metr za rok) vykazuje varianta, která uvažuje se zcela netěsným vnitřním spojem zateplovacího panelu v běžných okrajových podmínkách – viz obr. 3.



Vlhkostní pole



LEGENDA:

Přibl oblast
kondenzace:

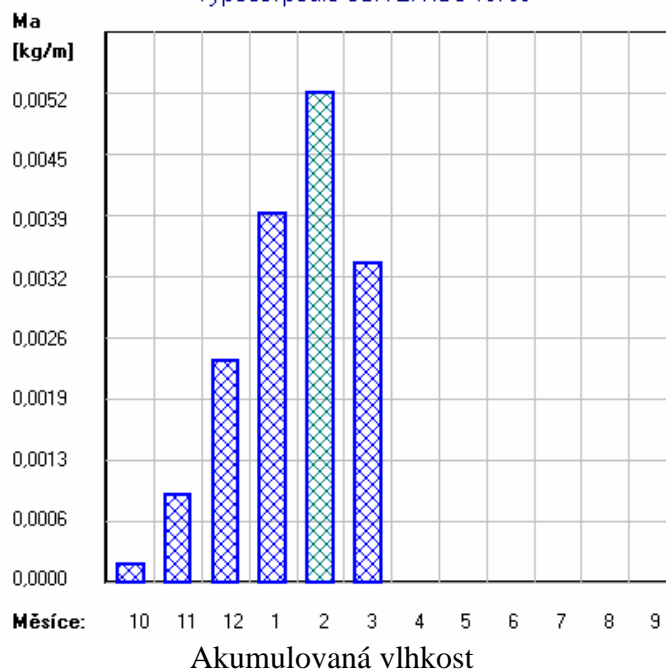
Te = -15,0 C

Toky vodní páry:
do kce: 4,02e-09 kg/s
z kce: 2,59e-11 kg/s
rozdíl: 3,99e-09 kg/s

Kondenzační oblast

Akumulované množství zkondenzované vlhkosti

Výpočet podle ČSN EN ISO 13788



LEGENDA:

Akumulovaná
vlhkost:

Na konci model.
roku je detail
vysušený.

Obr. 3: Výsledky 2D vyhodnocení varianty 10B

6 ZÁVĚR

Výpočtové hodnocení provedené v rámci habilitační práce prokázalo, že použití lehkých sendvičových tepelně izolačních panelů pro zateplení panelových objektů je zásadně možné. Dosažení normou doporučených hodnot součinitele prostupu tepla zateplené konstrukce lze vzhledem

k mimořádně vysoké izolační schopnosti polyuretanového jádra izolačních panelů bez obtíží dosáhnout.

Také posouzení průběhu difuze a kondenzace vodní páry zateplenou konstrukcí s uvažováním spárové difuze při dodržení všech základních předpokladů pro návrh a realizaci konstrukce bylo úspěšné, všechny požadavky týkající se množství kondenzátu a roční bilance kondenzace a vypařování jsou s velkou rezervou splněny a to i v extrémních klimatických podmínkách.

Pro potvrzení nebo vyvrácení hypotézy kolapsu tmelového spoje vnitřních plášťových desek zateplovacího systému a s ním spojeného výrazného zhoršení vlhkostního režimu zateplené konstrukce bylo provedeno variantní výpočtové hodnocení dvourozměrného teplotního a vlhkostního pole detailu styku sendvičových zateplovacích panelů, aplikovaných na zateplovanou konstrukci. Byly posouzeny všechny klíčové varianty řešení, hodnocené v předchozím výpočtu s uvažováním spárové difuze, včetně situace, kdy tmelový uzávěr spáry vnitřních plášťových desek sendvičových zateplovacích panelů se stane zcela nefunkčním a bude tak umožněn zvýšený difuzní tok do spáry mezi zateplovacími prvky. Výpočet prokázal, že jak v běžných okrajových a montážních podmínkách (při běžném stlačení těsnicího prvku), tak i v extrémních podmínkách (jak co se týče podmínek klimatických tak i montážních – volný spoj, případně nadměrně stlačený spoj) je kondenzační situace v zateplené konstrukci více než uspokojivá – v konstrukci sice dochází ke kondenzaci vodní páry, zkondenzovaná množství vodní páry jsou mimořádně nízká (řádově se jedná o několik gramů kondenzátu na běžný metr zateplené konstrukce) a veškerý kondenzát je schopen se v krátkém období modelového ročního cyklu vypařit.

I když provedené výpočty dvourozměrných teplotních polí jsou s ohledem na stanovení množství kondenzátu z pohledu platných norem výpočtem nenormovým, lze z výše uvedených skutečností s minimálním rizikem formulovat zásadní závěry provedené numerické analýzy.

Použití lehkých sendvičových izolačních panelů k zateplení obvodových plášťů panelových objektů je třeba hodnotit jako vysoce reálné. Tento systém zateplení vykazuje všechny výhody, které byly již zmiňovány v předchozích částech této práce a vyhovuje i v jediné rizikové oblasti jeho aplikace, kterou je kondenzace a vypařování vodní páry.

LITERATURA

- [1] Aroso, M.H.: Moisture condensation in thermal bridges. Establishing design criteria, International symposium „Moisture problems in building walls“ Porto, Portugal 1995
- [2] Claesson J.: Forced Convective-Diffusive Heat Flow in Insulations, A New Analytical Technique, In: 3rd Symposium Building Physics in the Nordic Countries, TU Denmark, Copenhagen 1993
- [3] Grunewald J. – Plagge R.: Non–isothermal Moisture Transport Calculations with DIM 3.1, In: International Journal for Restoration of Buildings, Vol 6/2000
- [4] Fanger, P.O.: Thermal Comfort, Mc Graw – Hill, New York 1970
- [5] Hagentoft, C.E. – Blomberg, T.: Coupled Heat, Air and Moisture Transport in Multi–layer Wall Structures, Manual with brief theory and an example , Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics, Lund 2000
- [6] Holm, A. – Künzle, H.M.: Combined effects of temperature and humidity on the deterioration process of insulation materials in ETICS, International symposium „Building Physics in the Nordic Countries, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 1999
- [7] Incropera, F.P. – Dewitt D.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley, New York 1996
- [8] Kjær, P.: Optimisation of reducing heat loss of building envelope, International symposium „Building Physics in the Nordic Countries, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 1999
- [9] Kriegel R. – Buchwald A. – Kaps Ch.: Material Structure and Diffusive Mass Transport as Pointed out by Means of Selected Examples, In: International Journal for Restoration of Buildings, Vol 6/2000
- [10] Mrlík, F.: Vlhkostné problémy stavebných materiálov a konštrukcií, Alfa Bratislava 1985
- [11] Mrlík, F.: Difuzní konstanty některých stavebních materiálů a konstrukcií, VÚPS Praha, 1980
- [12] Řehánek, J. – Janouš, A. – Kučera, P. – Šafránek J.: 4 x E – energetika, environment, ekonomika, efektivnost, Grada, Praha 2004
- [13] Šála, J.: Zateplování budov, Grada, Praha 2000
- [14] Vaverka, J. – Chybík, J. – Mrlík, F.: Stavební fyzika 2, VUT Brno 2000

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS

Ing. František Kulhánek, CSc

Vzdělání:

1960 – 1963	Odborné učiliště - obor zedník, Náchod
1961 – 1965	Střední průmyslová škola stavební, Náchod
1965 – 1970	ing. - Stavební fakulta ČVUT v Praze
1982	CSc - Stavební fakulta ČVUT v Praze
1983 – 1986	Jazyková příprava expertů, obor angličtina, PF Univerzity Karlovy v Praze
1991	Soudní znalec v oboru stavebnictví
2006	Autorizovaný inženýr v oboru pozemní stavby

Zaměstnání:

1970 – doposud	Katedra konstrukcí pozemních staveb Stavební fakulty ČVUT v Praze
----------------	--

Studijní pobyty:

- MISI Moskva 1976
- LISI St. Petěrburg 1976
- ISI Taškent 1976
- University of Malta 1991
- City University London 1992, 1994
- DTU Lyngby Dánsko 1994
- Technion Haifa Izrael 1995.

Odborná specializace:

- Tepelná ochrana budov
- Navrhování obvodových a střešních pláštů
- Nízkoenergetické a pasivní domy
- Provozní energetická náročnost staveb a její snižování

Pedagogické aktivity:

- Výuka předmětů:
Stavební fyzika – stavební tepelná technika,
Seminář k projektu,
Projekt 30 a 40, Project design 30 a 40 (v angličtině),
Navrhování obalových konstrukcí z hlediska stavebně fyzikálního
(doktorské studium).
- Vedoucí diplomových prací - v posledních pěti letech celkem 45 diplomantů, z toho 9 v anglickém jazyce,
3 děkanem oceněné diplomové práce.
- Školitel doktorského studia – 6 studentů již získalo titul PhD.,
v současné době školitel 4 doktorandů.

Výzkumné aktivity:

- V posledních pěti letech odpovědný řešitel 3 zahraničních grantů a spoluřešitel 2 zahraničních grantů.
- Spolupráce na grantech GAČR a výzkumném záměru.

Spolupráce s praxí:

- Soudní znalec se specializací na tepelnou ochranu budov – zpracováno celkem 166 znaleckých posudků
- Konzultant v oblasti návrhu a rekonstrukce obalových konstrukcí budov
- Spoluautor projektu komplexního zateplení tří panelových bytových objektů
- Konzultant pro oblast snižování provozní energetické náročnosti budov

Publikační aktivity:

- Spoluautor 9 monografií
- Autor 2 vysokoškolských skript
- Spoluautor 4 vysokoškolských skript
- Autor 17 příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencí
- Autor 4 příspěvků ve sbornících českých konferencí
- Autor 36 článků v českých odborných časopisech