

## Recenzní posudek disertační práce Ing. Petra Švarce

### „Termodynamické procesy při akumulaci tepla ve vodních zásobnících“

---

Posuzovaná práce má 113 číslovaných stran textu, 46 obrázků a 1 stranu přílohy. Kromě toho je na začátku ještě 13 stran nečíslovaných (např. titulní list, anotace, seznam označení a obsah). Práce je členěna do 6 kapitol, následují seznamy literatury a jedna příloha.

Práce se zabývá velmi aktuální problematikou ukládání energie ve vodních akumulacích tepla. Hlavní část práce se zaměřuje na zkoumání procesů při akumulaci tepla do upravené nádrže o celkovém objemu přibližně 1000 litrů. Proměřováno bylo teplotní pole v průběhu času, vyhodnocovány byly toky hmoty a tepla. Dále byla zkoumána jedna dílčí úloha, a sice přirozená konvekce z vodorovného válce.

První dvě kapitoly jsou úvod do problematiky a popis metod používaných k posouzení teplotní stratifikace v nádrži. Je zde provedena rešerše dostupných poznatků a zavedena používaná terminologie.

Následující kapitola č. 3 popisuje vlastní experimentální zařízení a jeho části. Je zde uvedeno několik používaných způsobů zapojení zařízení. Ovšem i v této kapitole jsou části rešeršního charakteru. Poněkud nesourodě působí část 3.5 kde je zaveden pojem "penetrační hloubka" a kde se popisují metody jejího vyhodnocení s četnými odkazy na literární zdroje. Přitom dochází ke zřejmému odklonu od popisu experimentu k přehledu dostupných poznatků, zavádění další terminologie a parametrů. To vše by mělo být spíše v úvodní a rešeršní části práce.

Následující kapitola č. 4 formuluje jednu dílčí úlohu, významnou pro nepřímo nabíjené zásobníky, a sice přirozenou konvekci z horizontálního válce. Řešení je prováděno jednak numericky, jednak experimentálně. Velká část kapitoly 4 ovšem pokračuje v přehledu dostupných poznatků, které by měly být spíše v úvodní a rešeršní části práce.

Numerické řešení je provedeno pomocí komerčně dostupného programu FLUENT, okrajovou podmínkou je konstantní tepelný tok. Experimenty byly prováděny v průhledné nádrži o objemu 40 l, která se osvědčila při provádění optických experimentů metodou PIV a LIF – viz konferenční příspěvek [46], na kterém se doktorand podílel spoluautorsky. Experimentálně zkoumaný válec má průměr 22 mm a délku 200 mm. Je vyroben z měděné trubky a ohříván horkou vodou. Uprostřed délky je osazen 10 termočlánky pro měření povrchové teploty. Práce bohužel neuvádí naměřené rozložení teplot na obvodu válce ani jaká okrajová podmínka na válci byla realizována při experimentu. Problematika měření teploty povrchu měděného válce pomocí termočlánků by si zasloužila objasnění - zaměřují se na ni dotazy na druhé straně tohoto textu.

Kapitoly č. 5 a 6 se věnují analýze získaných výsledků a popisu závěrů. Autor prezentuje vyhodnocenou penetrační hloubku, porovnává vlastní výsledky s dostupnými údaji a provádí aproximaci naměřených údajů racionální funkcí. Dále je předveden časový vývoj teplotních profilů a účinností. Psaný projev je komplikován tím, že do vlastních výsledků jsou zanořeny poznatky z literatury, které by měly patřit spíše do úvodní a rešeršní části práce (např. obr. 25, který je převzatý z článku [30]).

Charakter experimentálních výsledků přirozené konvekce z horizontálního válce se podstatně odlišuje od všech uvedených referenčních průběhů i od vlastní numerické simulace (např. obr. 43). Autor by se měl pokusit tuto odlišnost vysvětlit. Navrhovat kritériální rovnici (113) má význam, ovšem uvádět konstanty na 4 platné číslice je nadnesené.

Jak vyplývá z textu u rovnice (114) i z části závěru (6.2), další výzkum by měl zlepšit věrohodnost kritériálních rovnic opakováním měření při použití přesnějších snímačů a přístrojů. To by mohlo být přínosné. Ovšem větší vliv by pravděpodobně mohlo mít zlepšení experimentálního modelu. Např. pozornost by si zasloužilo vyhodnotit tepelné ztráty na vstupu a výstupu vody do ohřívajícího válce, popř. věnovat úsilí na možné zmenšení této ztráty.

### ***Připomínky a otázky***

(1) Měření termočlánky připájenými do měděné trubice (obr. 20 až 22) předcházela kalibrace. Byl ověřen vliv vodivého propojení všech 10 termočlánků měděnou trubkou dohromady? Byla kalibrace provedena před jejich zabudováním nebo až po něm?

(2) Jaké bylo rozložení teplot povrchu válce, a jak tyto teploty odpovídají teplotám vody na vstupu a výstupu,  $T_{vst}$  a  $T_{výst}$ ?

(3) Tab. 9 uvádí relativní chybu Nusseltova čísla téměř vždy menší než relativní chybu výkonu. Jak je to možné? Jinak řečeno, jaký je vliv nejistoty měření pomocí termočlánků na nejistotu vyhodnocení Nusseltova čísla? Pro odpověď doporučuji aplikovat větu o přenosu chyby (obdobu rov. (111)) na vyhodnocení Nusseltova čísla, tj. na rovnici (112).

*Formální připomínky:* Překlepy v práci jsou poměrně četné, a to dokonce i v rovnicích. Např. chyby v konvektivních členech v rovnicích (64, 65 a 67) a konstanty v rovnicích (83-86). Další překlepy jsem vyznačil v originálu práce.

### ***Hodnocení***

Cíle práce byly vytčeny ve třech bodech. Tyto cíle byly splněny.

Předložená disertace řeší velmi aktuální a zajímavé téma. Používá adekvátním způsobem vědecké metody řešení úlohy. Autor shromáždil dostatek poznatků z literatury a prokázal zvládnutí dostupných metod pro řešení. Dosažené výsledky jsou přínosné v oboru a prokazují schopnost vědecké práce.

Výše uvedené nedostatky ve struktuře psaného projevu jsou míněny jako doporučení, která by mohla přispět k dalšímu odbornému růstu.

### ***Celkové hodnocení disertační práce***

Práci doporučuji k obhajobě. Při úspěšném průběhu obhajoby doporučuji udělení titulu Ph.D.



Praha, 4.1.2017

doc. Ing. Zdeněk Trávníček, CSc.  
Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.

Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.  
Radomská 469  
18100 Praha 8

## O p o n e n t n í   p o s u d e k

**disertační práce Ing. Petra Švarce : *Termodynamické procesy při akumulaci tepla ve vodních zásobnících*, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Liberec, 2016.**

---

Předložená disertační práce obsahuje 114 stran textu včetně obsahu, seznamu použitých označení, cílů disertační práce, prázdného listu, seznamu použité literatury, který má 54 pramenů, seznamu vlastní autorovy literatury a 1 listu přílohy. Dále disertační práce obsahuje titulní list, prohlášení, poděkování, anotace v jazyce českém a v jazyce anglickém a klíčová slova.

Tématem práce jsou výsledky výzkumu zaměřeného na ukládání energie ve vodních akumulacích zásobnících.

V úvodu jsou popsány obecné principy akumulace tepla, základní vlastnosti látek, které v minulosti byly uvažovány, nebo byly použity, pro akumulaci tepla. Je uveden významný jev teplotní stratifikace v akumulacích nádrží. Jsou shrnuty veličiny používané k popisu dějů v zásobnících. Cíle disertační práce jsou předloženy ve zvláštním odstavci před vlastním textem disertační práce.

Ve druhé kapitole jsou shrnuty základní metody používané k posouzení účinků stratifikace v akumulacích zásobnících. Jedná se o definici veličin, které umožňují vyjádřit účinnost v provozních režimech zásobníků. Jsou vysvětleny metody vycházející z energetických bilancí a metody, které se zaměřují na nevratné procesy.

Třetí kapitola pojednává o experimentálním zařízení, na němž byla provedena podrobná měření v různých provozních podmínkách. Byly získány významné údaje o teoretické hodnotě tepelné kapacity a o celkových tepelných ztrátách zásobníku. Pro daný zásobník je vyšetřována penetrační hloubka jako veličina, která charakterizuje pohyb tekutiny uvnitř nádrže.

Ve čtvrté kapitole je otevřeno nové téma – přenos tepla volnou konvekcí na vodorovné trubce. V koncepci tepelných procesů při akumulaci tepla toto téma je aktuální pro nepřímé dodávání tepla do zásobníků. Je provedena dimenzionální analýza a z rešerše je uvedena větší řada kritériálních rovnic pro zkoumaný problém. Je provedena numerická simulace, jejímž výsledkem je tabulka hodnot tepelného toku v závislosti na průměru trubky a teplotní diferenci mezi teplotou povrchu válce a teplotou okolní vody. Následuje popis experimentu ke stanovení součinitele přestupu tepla volnou konvekcí na vodorovném válci.

Pátá kapitola obsahuje rozbor dosažených výsledků. Výsledky experimentů z provozu akumulacního zásobníku tepla jsou porovnány s dostupnými výsledky jiných autorů a jsou diskutovány. Podrobně jsou uvedeny ukazatele výkonu a údaje o hodnotách účinností. Další podrobné údaje jsou uvedeny z měření teplotních profilů uvnitř nádrže. V dalším odstavci je provedena analýza výsledků výzkumu volné konvekce na vodorovném válci. Výsledky numerické simulace a výsledky experimentů jsou porovnány a je odvozena empirická kritériální rovnice pro přestup tepla volnou konvekcí na vodorovném válci.

V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky a nové získané poznatky. Tyto poznatky rozšiřují údaje o penetrační hloubce ve vztahu ke stratifikačnímu číslu. Jsou uvedeny údaje o výkonech a účinnostech provozu vodního zásobníku akumulace tepla. Kritériální rovnice pro přestup tepla volnou konvekcí na vodorovném válci je poznatkem získaným na základě experimentů i s uvažováním podkladů z analýzy nejistot. Jsou vytyčena témata pro další navazující výzkum.

## Hodnocení :

Obor termomechanika přináší v návaznosti na aplikace stále nová témata. Je to tím, že v současných poznatcích zůstávají složité tepelné procesy jen na dílčích modelech, jejichž řešení dává dílčí podklady pro stavbu a provoz tepelných zařízení. Základním východiskem jsou zpravidla poznatky z termodynamiky a ze sdílení tepla. Velmi důležité ve výzkumu, který má pro potřeby aplikace přinést důležité kvantitativní údaje, jsou rozborů a diskuse dosažených výsledků a konfrontace výsledků dosažených užitím nezávislých výzkumných metod. Autor disertační práce se zaměřil na tepelné procesy při akumulaci tepla ve vodních zásobnících. Vedle úsilí o soustředění teoretických podkladů se především zaměřil na vlastní experimenty. Formuloval si cíle výzkumu, který má vyšetřit vlivy a účinky procesů na kvalitu ukládání a využití tepla ve vodních zásobnících. V teoretické části navázal na poznatky z odborné literatury, ale rozhodující byl experiment provedený na zásobníku tepla vybudovaného jako výzkumné laboratorní zařízení. Autorovy experimenty umožnily získat vlastní původní výsledky o penetrační hloubce při vtoku vody jako média pro akumulaci tepla do zásobníku. Dále autor disertační práce na základě svých experimentů určil údaje pro vyhodnocení výkonu při akumulaci tepla a určil účinnosti akumulace tepla v zásobnících. Autorem zjištěné průběhy teplotní profilů při provozu zásobníku jsou určitě cennými daty pro detailní sledování tepelných procesů v zásobníku tepla. Zcela zvláštní kapitolou výzkumu jsou provedené experimenty pro určení součinitele přestupu tepla volnou konvekcí na povrchu vodorovného válce. Tento tepelný proces bude mít pro akumulaci zřejmě význam při vnějším dodávání tepla do zásobníku. O tomto problému je v odborné literatuře rozsáhlé množství informací. Autor disertační práce si udělal podrobnou rešerši a zjistil značný rozptyl dat. Jeho vlastní experiment doplněný numerickou simulací ho přivedl k určení jeho původní kritériální rovnice, která nejlépe vystihuje pomocí teorie podobnosti přestup tepla volnou konvekcí na vnějším povrchu vodorovné trubky.

Autor disertační práce ve svém výzkumu postupoval správně, dobře si připravil a aplikoval výzkumné metody a splnil stanovené cíle. Disertační práce je napsána dobře, přehledně, dobrou češtinou, s minimálním množstvím překlepů nebo formálních nedostatků.

V diskusi při obhajobě by se autor měl vyjádřit k následujícím oponentovým poznámkám :

- 1) Ve vnitřních vestavbách pro vnější dodávání tepla do zásobníku budou zřejmě trubkové svazky. Uvažoval autor o volné konvekcii v soustavě vodorovných trubek?
- 2) Autor v převážné většině cituje zahraniční literární zdroje. V české odborné literatuře lze nalézt literární prameny, které mohou inspirovat nebo dokonce pomoci při výzkumu tepelných procesů. Jsou to např.

M.Sazima et al : Teplo, SNTL, Praha, 1989

J.Chyský et al : Větrání a klimatizace, BOLIT, Brno, 1993

Sazima et al : Sdílení tepla, SNTL, Praha, 1993

i na internetu je možné se setkat s pozoruhodnými odkazy, např.

M.Pavelek : [http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17\\_Konvekce.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf)

Oponent rád uvádí obrázek zobrazující názorně laminární volnou konvekcii pro vodorovný válec. Tento obrázek oponent dostal darem od p.Prof.M.Pavelka a je přílohou tohto posudku.

- 3) V zahraniční učebnici

Y.A.Cengel, M.A.Boles : Thermodynamics. An Engineering Approach, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994

autoři uvádějí na str.384, pozoruhodný problém č.6-157 o explozi horkovodní tlakové nádoby v roce 1982 ve škole v Oklahomě při selhání ventilů a termostátů. Při explozi tehdy zahynulo 7 lidí a 33 dalších bylo zraněno. Čtenář učebnice je vyzván k řešení energie exploze s vyjádřením v ekvivalentu TNT, když v tlakové nádobě je 100 l vody a při tlaku 2 MPa dojde k explozi. Může autor disertační práce stručně informovat o zabezpečení jeho experimentálního zařízení?

4) Oponent přiznává, že má od svých studijních let alergii na termín "chlad". Autor disertační práce by měl vysvětlit jeho pojetí pojmu "chlad", který mnohokrát v textu používá. Vysvětlit by ho měl především v souvislosti s termodynamickými zákony.

5) Kvalifikační práce jsou zpravidla příležitostí k zavádění nových termínů a označení. Stává se, že se mnohdy argot stane běžným užívaným pojmem. Autor by měl zvážit, zda na příklad "nabíjení" a "vybíjení" akumulátoru tepla není jen provozní hantýrka.

#### **Závěr :**

Předložená disertační práce je bezpochyby přínosná pro výzkum a pro aplikace při stavbě a provozu vodních zásobníků pro akumulaci tepla. Autor splnil stanovené cíle tím, že provedl experimenty a získal původní výsledky o tepelných procesech při akumulaci tepla ve vodních zásobnících. Své výsledky vyjádřil v závislostech umožňujících řešit a posoudit kvalitu ukládání tepla ve vodních zásobnících. Předložená disertační práce je podnětná a bezpochyby budou na ní navazovat další výzkumné práce a budou se z ní odvíjet další podněty pro výzkum, stavbu a provoz zásobníků pro akumulaci tepla. Autor prokázal svojí tvůrčí aktivitu a své vynikající odborné znalosti v oborech termodynamiky, experimentální techniky a numerického modelování ve sdílení tepla. Oponent

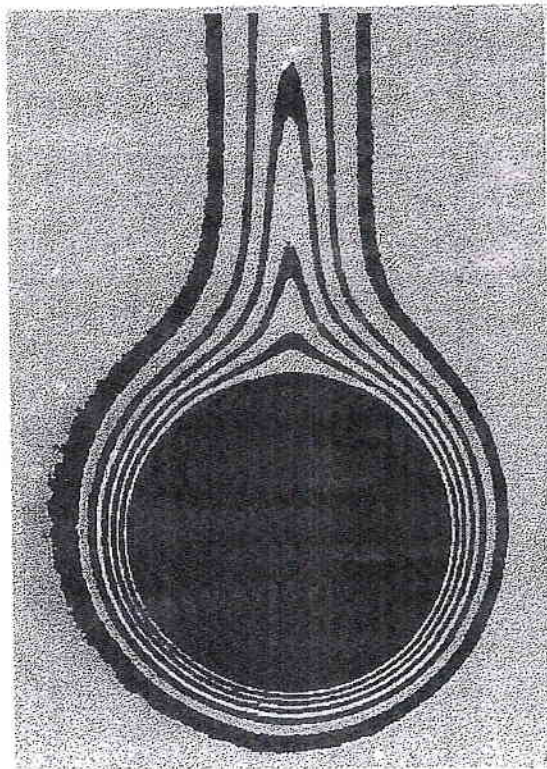
**doporučuje disertační práci Ing. Petra Švarce k obhajobě**

před komisí pro obhajoby disertačních prací v doktorském studijním programu Strojní inženýrství, studijním oboru Aplikovaná mechanika a doporučuje, aby po úspěšné obhajobě byl Ing.P.Švarcovi udělen akademicko-vědecký titul

**Philosophiae doctor (PhD.).**



V Praze 13. ledna 2017



Teplotní pole v okolí horizontálního  
válce při volné konvekci ve vzduchu  
(holografický interferogram)

- $t_w - t_\infty = 16,3 \text{ K}$ ,  $d = 39,5 \text{ mm}$ ,  $Gr Pr = 8,7 \cdot 10^4$
- interferenční proužky představují izotermy

Přenos tepla prouděním 4-3F1

PAVELEK, M.: Záznam z optické laboratoře FS VUT v Brně

# Posudek oponenta na doktorskou disertační práci

zpracovanou na téma

## Termodynamické procesy při akumulaci tepla ve vodních zásobnících

kterou předložil doktorand, pan

**Ing. Petr Švarc**

K oponování byla předložena disertační práce Ing. Petra Švarce o rozsahu 114 stran, včetně seznamu použité literatury, seznamu vlastních publikací a přílohy. Práce je systematicky členěna do 6 kapitol.

### *1. Aktuálnost tématu disertační práce*

Současná společnost se vydává cestou udržitelného rozvoje, kdy je při stavbě nových budov kladen důraz na nízkou spotřebu tzv. primární energie, což vede k nárůstu využití obnovitelných zdrojů energie. Nejsnáze dostupným obnovitelným zdrojem je solární záření, které je však dostupné pouze po omezenou část dne a jehož intenzita se v průběhu dne i roku mění. Pro efektivní pokrytí potřeb budov je tak zapotřebí získanou energii akumulovat, přičemž musí být zajištěna maximální efektivnost uskladnění této energie pro další použití. Předložená disertační práce se zabývá procesy při akumulaci tepla ve vodních zásobnících, přičemž hlavní důraz je kladen na posouzení vlivu konstrukce zásobníku na účinnost skladování energie. Práce je tedy zpracována na aktuální téma s vysokým potenciálem dalšího využití.

### *2. Splnění cílů disertační práce*

Disertační práce si kladla za cíl prozkoumat proces ukládání energie ve vodních tepelných zásobnících, zejména pak vliv dějů, probíhajících při procesu nabíjení a vybíjení zásobníku, na kvalitu ukládané tepelné energie. Cíl práce byl rozčleněn do tří dílčích cílů, kterými byly:

- návrh a stavba experimentálního zařízení,
- výzkum vlivu přívodu a odvodu tepla a přívodu a odvodu teplotnosné kapaliny na přirozené a nucené proudění v akumulacích zásobnících,
- výzkum stratifikace a časového průběhu teplotního rozvrstvení a vliv stratifikačního zařízení na kvalitu ukládané tepelné energie, tvorba nástroje k posouzení vlivu konstrukce a geometrického uspořádání zásobníku na tepelnou stratifikaci při nabíjení a vybíjení akumulacního zásobníku.

První dva dílčí cíle jsou v předložené disertační práci splněny beze zbytku. Třetí dílčí cíl byl splněn pouze částečně, kdy v předložené disertační práci jsou uvedeny výsledky výzkumu

stratifikace a časového rozvrstvení u přímo nabíjeného výměníku. Vliv stratifikační vestavby je zohledněn pouze částečně a to výzkumem přenosu tepla z horizontálního válce, který je umístěn v prostoru, odpovídajícímu stratifikační vestavbě u nepřímo nabíjených akumulacních nádrží. Popis nástroje pro posouzení konstrukce akumulacních zásobníků tepla není uveden vůbec. Tento nedostatek je patrně způsoben přílišnou ambiciózností dílčího cíle, kdy provedení měření na různých stratifikačních vestavbách je časově velmi náročné a vydalo by na samostatné téma disertační práce. Stejně tak vytvoření nástroje pro posouzení konstrukce akumulacních zásobníků by bylo smysluplné pouze v případě, že by získané výsledky odhalily jednoznačné souvislosti mezi geometrií a umístěním vstupů do akumulacní nádrže a účinností akumulace energie. Tyto souvislosti však nebyly nalezeny a požadovaný nástroj tak nebylo možno vytvořit.

### *3. Zvolené metody*

Ing. Petr Švarc pro řešení zvolené problematiky použil pro něj dostupných experimentálních i numerických metod. Dále využil dostupných výrobních a montážních technologií. Ve všech případech se zřejmě jedná o metody, jejichž použití je v dané situaci opodstatněné. Popisu zvolených metod je v disertační práci věnováno dostatek prostoru.

### *4. Výsledky disertační práce a jejich přínos pro vědní obor*

Výsledky obsažené v disertační práci poukazují na komplexnost problematiky nabíjení a vybíjení vodních zásobníků. Výsledky disertace jsou v souladu s cíli disertační práce a přináší řadu nových cenných odborných technických poznatků v řešené oblasti. Konkrétní přínos získaných výsledků disertační práce spatřuji v porovnání různých metod posouzení účinnosti akumulace tepla ve vodních zásobnících a formulaci empirických vztahů pro stanovení penetrační hloubky a ztrátové výšky.

### *5. Znalost doktoranda v oblasti řešené problematiky*

Doktorand Ing. Petr Švarc zpracováním předložené práce prokázal znalost zkoumané problematiky na vysoké úrovni. Dobře zvládl teoretický i praktický popis dané problematiky, včetně použitých experimentálních i numerických nástrojů.

### *6. Formální stránka zpracování disertační práce*

Po formální stránce má disertační práce dobrou jazykovou a přijatelnou grafickou úroveň. Práci bych však vytkl určitou nelogičností uspořádání, kdy po kapitole věnované popisu experimentálního zařízení bych již očekával vyhodnocení výsledků a ne kapitolu povětšinou zaměřenou na teorii konvektivního přenosu tepla. V práci se dále vyskytují určité nedostatky ve správném uvádění jednotek, matematických pojmech a chybná označení materiálových norem. Uvedené nedostatky však nemají vliv na obsah předložené disertační práce.

### *7. Celkové zhodnocení a vyjádření k udělení akademického titulu Ph.D.*

Předložená disertační práce má přes zmíněné minoritní nedostatky velmi dobrou technickou úroveň. Představuje hodnotný podklad jak pro další vývojové práce, tak pro průmyslovou praxi v řešené specializaci.



**Předloženou doktorskou disertační práci doporučuji k obhajobě a po úspěšném obhájení doporučuji udělit doktorandovi akademický titul Ph.D.**

8. *Připomínky a dotazy*

- Práce se poměrně obsáhle věnuje problematice hodnocení účinnosti akumulace tepelné energie, přičemž není zřejmé, který parametr se doktorandovi jeví jako nejvhodnější. Který z uvedených ukazatelů byste doporučil využít pro optimalizaci návrhu vodního zásobníku?
- Při experimentálním stanovení hodnot součinitele přestupu tepla z horizontálního válce předpokládáte, že je teplota povrchu válce po délce konstantní, což však neodpovídá zvolenému způsobu “vyhřívání” válce. Byla provedena např. termovizní měření pro posouzení změny teploty v podélném směru? Šlo by nějak při vyhodnocení zohlednit změnu teploty v podélném směru?

V Brně dne 14. 2. 2017



Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.  
Oponent disertační práce