

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ústav automatizace a měřicí techniky

Ing. Petr Beneš

**Analýza dějů na teplosměnném povrchu
metodou akustické emise**

**Process Analysis on Heat Transfer Surface
Using the Acoustic Emission Method**

Teze doktorské dizertační práce

PhD Thesis

Obor: Kybernetika a informatika

Školitel: doc. ing. Ludvík Bejček, Csc.

Oponenti: prof. ing. Stanislav Ďaďo, DrSc.
doc. RNDr. Zdeněk Weber, CSc.

Datum obhajoby: 22. 3. 2001

© 2001 Petr Beneš
ISBN 80-214-1958-X
ISSN 1213-4198

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1. AKUSTICKÁ EMISE	6
2.2. VAR KAPALIN	7
2.3. AE PŘI VARU KAPALIN	10
3. CÍL PRÁCE	10
4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	11
4.1. NÁVRH MODELU VZNIKU AE	11
4.2. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	13
4.3. VAR VE VELKÉM OBJEMU	13
4.4. VAR V TENKÉ VRSTVĚ	16
5. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	20
6. ZÁVĚR	21
7. ABSTRACT	22
7.1. INTRODUCTION	22
7.2. STATE-OF-THE-ART	22
7.3. OBJECTIVES OF THE THESIS	23
7.4. PROCESSING METHODS	23
7.5. MAIN RESULTS	26
7.6. CONCLUSIONS	26
8. LITERATURA	27
9. CURRICULUM VITAE	28

1. ÚVOD

Dizertační práce je věnována problematice akustické emise (AE) a jejímu využití pro analýzu procesů probíhajících na teplosměnném povrchu při zahřívání a varu kapalin ve velkém objemu a v tenké vrstvě. Řešená problematika má principiálně značné praktické využití, metoda AE je jednou z mála reálně využitelných metod schopných indikovat počátek varu [20]. To je významné v některých technologických procesech, např. vznik varu lze u tlakovodního reaktoru považovat za předhavarijní stav a u rychlého reaktoru chlazeného tekutými kovy za havarijní stav. Na druhou stranu například včasná predikce krize varu u výměníků tepla by umožnila významné zvýšení koeficientu bezpečné hustoty tepelného toku a tím i jejich účinnosti. Var v tenké vrstvě je technicky významný při chlazení postřikem, v generátorech páry s velmi rychlou odezvou, při chlazení raketových trysek, odpařování paliva ve vstřikovacích motorech apod. Velmi významnou aplikací je také havarijní chlazení jaderného reaktoru v případě poškození primárního okruhu [4], [8]. Podobně jako u varu ve velkém objemu je i v případě varu v tenké vrstvě principiálně velmi obtížné určení okamžité hustoty procházejícího tepelného toku v reálných podmínkách a metoda AE by mohla být jednou z mála vhodných metod.

Dizertační práce se v úvodu věnuje nezbytnému shrnutí problematiky AE, kde jsem se zaměřil především na problematiku ověřování parametrů snímače a dále se věnuje vzniku a popisu jednotlivých fází varu kapaliny ve velkém objemu. Na základě provedeného teoretického rozboru je navržen nový model vzniku AE při varu v nedohřáté a přehřáté kapalině. Experimentálně je ověřen vznik akustické emise při varu kapalin ve velkém objemu a v tenké vrstvě. Pro potřeby experimentu byl navržen a realizován zdroj tepelného toku umožňující dosáhnout kritického tepelného toku při varu ve velkém objemu v laboratorních podmínkách a současně snímat vznikající AE kontaktním snímačem v bezprostřední vzdálenosti. Var v tenké vrstvě byl simulován odpařováním kapky na teplosměnném povrchu. Získaný signál AE odpovídající různým uspořádáním experimentu byl podroben důkladné analýze s cílem nalézt nejvhodnější parametry, příp. sadu parametrů signálu AE, které budou nejlépe informovat o přehřátí teplosměnného povrchu a tím i o hustotě tepelného toku procházejícího z teplosměnného povrchu do kapaliny, příp. změně součinitele přestupu tepla zkoumaného povrchu. Získané závislosti jsou konfrontovány s předpoklady vycházejícími z navrženého modelu vzniku AE na teplosměnném povrchu.

K dosažení zvoleného cíle bylo potřebné shromáždit nejen experimentální vybavení pracoviště (snímače, přístrojová technika, kalibrační pracoviště), ale bylo také nutné vytvoření poměrně rozsáhlých a z hlediska potřebné doby vývoje časově náročných knihoven pomocných programů, zajišťujících řízení experimentu, sběr a následné zpracování, analýzu a prezentaci získaných dat. Převážná část knihoven programů je realizována v prostředí LabView fy National Instruments.

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dizertační práce vychází z podrobného literárního průzkumu. Byly využity elektronické rešeršní databáze společností SilverPlatter a Bell+Howell (INSPEC, Dissertation Express, ProQuest Databases, Compendex a další), databáze výzkumných zpráv NASA, databáze citačního indexu, knihovní fondy Moravské zemské knihovny Brno, Státní vědecké knihovny Praha, univerzitní knihovny Delft University of Technology, Holandsko, univerzitní knihovny University of Huddersfield, Velká Británie, patentový průzkum prostřednictvím patentových serverů, normy a doporučení ASTM, časopisy Journal of Heat Transfer, International Journal of the Heat and Mass Transfer, Journal of Fluid Mechanics, Journal of Physics, Canadian Journal of Physics, The Journal of the Acoustical Society of America, Дефектоскопия, Journal of Acoustic Emission a český NDT bulletin.

2.1. Akustická emise

Pro využití akustické emise (dále jen AE) generované při změnách hustoty tepelného toku se musíme zabývat popisem jevu AE, snímači AE, jejich vlastnostmi a kalibrací, vznikem a šířením signálu AE v pevné fázi, kapalině a vzduchu, v neposlední řadě i příslušnou přístrojovou technikou a metodami umožňujícími sběr, zpracování a analýzu signálu AE.

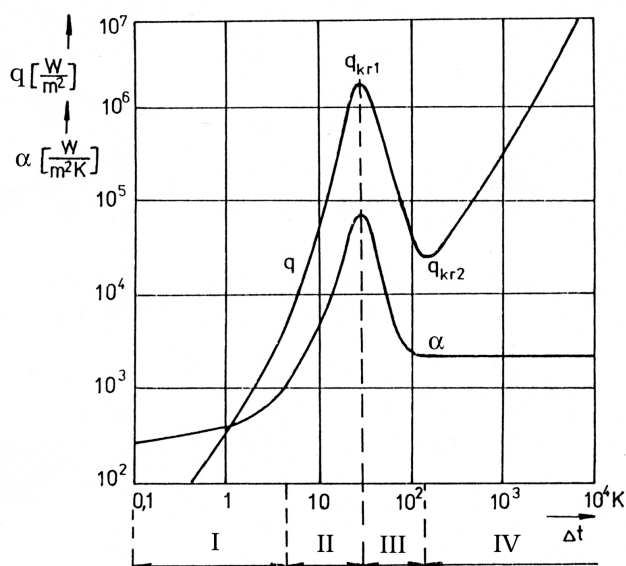
Akustickou emisí se rozumí třída jevů, při kterých dochází k jednorázovému generování elastických vln v důsledku skokového uvolnění nahromaděné energie v jednom místě materiálu. Metoda akustické emise je intenzivně rozvíjena od první poloviny padesátých let. Hlavní aplikační oblastí AE je bezdemontážní diagnostika a monitorování technologických procesů. Při pohledu na AE jako na diagnostickou metodu patří k hlavním výhodám integritnost (pokrývá celý objekt), rychlá příprava měření, dálková detekce a lokalizace vad, vysoká citlivost, požadavek pouze částečného přístupu k objektu, spolehlivost, 100% kontrola i velmi rozsáhlých objektů. Mezi problémové oblasti metody, z nichž některé jsou v dizertační práci podrobně diskutovány, patří zejména mechanismus vzniku AE, šíření, útlum a rozptyl generovaných elastických vln, návrh snímače a jeho kalibrace, lokalizace zdroje AE, návrh měřicí aparatury, vyhodnocení a interpretace signálu AE, rozpoznání typu zdroje.

O problematice AE referuje specializovaný Journal of Acoustic Emission, každoročně se pořádají konference, existuje několik monografií, např. [14], [21], některé dílčí problémové oblasti jsou zpracovány i ve formě doporučení a norem [1]. Zájem o akustickou emisí neustále roste, problematikou se zabývá řada pracovišť ve světě, zařízení a snímače pro AE má ve svém výrobním programu několik desítek firem. V České republice pracuje v rámci ČNDT Odborná skupina akustické emise.

2.2. Var kapalin

Vzhledem k velmi úzké návaznosti varu kapalin a problematiky optimálního návrhu výměníků tepla bylo v uvedené oblasti publikováno obrovské množství článků, referátů, monografií a příruček, např. [3], [4], [7], [8], [9], [10], [12], [16], [18], [19], [23]. Velmi podrobně byly zkoumány závislosti přestupu tepla na tlaku, struktuře a poloze teplosměnného povrchu, hydrodynamických a chemických parametrech ohřívané kapaliny a mnoha dalších parametrech. Přesto však nelze konstatovat, že je problematika varu kapalin k dnešnímu dni beze zbytku teoreticky vyřešena. Vzhledem k náročnosti problematiky je množství uváděných a používaných vztahů založeno na empirických zkušenostech a měřeních experimentátorů.

Typický průběh závislosti hustoty tepelného toku q a součinitele přestupu tepla α na rozdílu teplot stěny T_s a teploty změny skupenství T_{23} pro vodu při normálním tlaku je na *obr. 1*.



Obr. 1: Závislost hustoty tepelného toku q a součinitele přestupu tepla α na rozdílu teplot stěny T_s a teploty změny skupenství T_{23} pro var ve velkém objemu [9]

Na zobrazené křivce závislosti hustoty tepelného toku můžeme pozorovat několik charakteristických režimů provozu teplosměnného povrchu: přirozená konvekce (I), bublinkový var (II), první krize varu, přechodný var (III), druhá krize varu, blánový var (IV).

Největší pozornost byla věnována bublinkovému varu ve velkém objemu, který má z praktického hlediska největší význam. Nejčastější popis vychází z představy přenosu tepla v mezní vrstvě a předpokládá se kritériální rovnice, v níž vystupuje Nusseltovo, Reynoldsovo a Prandtlovo číslo [4], [8], [10], [15], [26]. Jedno z nejúspěšnějších řešení publikoval v roce 1952 Rohsenow [17], když odvodil funkční závislost ve tvaru:

$$\text{Nu} = \frac{1}{C_{SF}} \text{Re}^{(1-n)} \text{Pr}^{-m} \quad (1)$$

Po dosažení za podobnostní čísla dostaneme vztah mezi přehřátím teplosměnného povrchu a hustotou tepelného toku, uváděný v různých obměnách ve většině publikací:

$$\frac{c_2 \cdot (T_s - T_{23})}{l_{23}} = C_{SF} \cdot \left(\frac{q}{\eta_2 \cdot l_{23}} \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_2 - \rho_3)}} \right)^n \cdot \left(\frac{c_2 \cdot \eta_2}{\lambda_2} \right)^{m+1} \quad (2)$$

kde c_2 – měrná tepelná kapacita kapaliny, T_s je teplota povrchu stěny, T_{23} je teplota syté páry, l_{23} je měrné skupenské teplo výparné, q je hustota tepelného toku, η_2 je kinematická viskozita kapaliny, σ je povrchové napětí, ρ_2 resp. ρ_3 je hustota kapalná resp. plynné fáze a λ_2 je měrná tepelná vodivost kapaliny. Koeficient C_{sf} je závislý na typu povrchu a kapaliny a určuje se experimentálně, pro nejpoužívanější kombinace materiálu povrchů, kvality povrchu a typů kapalin je tabelován. Exponent n Rohsenow doporučuje volit 0,33 a exponent m 0,7 a speciálně pro vodu roven nule.

Var v tenké vrstvě byl zkoumán okrajově, publikované podklady jsou poměrně skromné [3], [4], [8]. Var tenké vrstvy kapaliny je zvláštním případem, kdy je teplosměnný povrch smáčen malým množstvím tekutiny, resp. pouze samostatnými kapkami. Díky malé tloušťce kapaliny potom nedochází k plnému rozvoji generovaných parních bublinek při bublinkovém varu. Součinitel přestupu tepla je závislý na tloušťce vrstvy. Minimální hodnoty (cca 90 % hodnoty pro var ve velkém objemu) dosahuje při tloušťce vrstvy odpovídající dvojnásobku maximálního průměru parní bubliny. Při menších tloušťkách součinitel přestupu tepla roste až o 50 % [19]. Je to způsobeno zvýšením frekvence odtrhávání parních bublinek, jejichž doba růstu klesá s druhou mocninou maximálního průměru parní bublinky. Maximální průměr bublinky klesá se zmenšující se tloušťkou vody nad výhřevným povrchem. Při blánovém varu potom nad povrchem levitují jednotlivé kapky kapaliny, mající tvar sféroidu (Leidenfrostův efekt).

Pro odhad hustoty tepelného toku při bublinkovém varu v tenké vrstvě jsou obvykle používány podobné vztahy jako pro bublinkový var ve velkém objemu, pouze s jinými konstantami. Vzhledem k nesrovnatelně menšímu počtu provedených experimentálních měření a komplikovanějšímu teoretickému popisu probíhajících dějů ve srovnání s technicky významnějším varem ve velkém objemu jsou však prakticky v každé původní práci doporučované korelace uváděny odlišně.

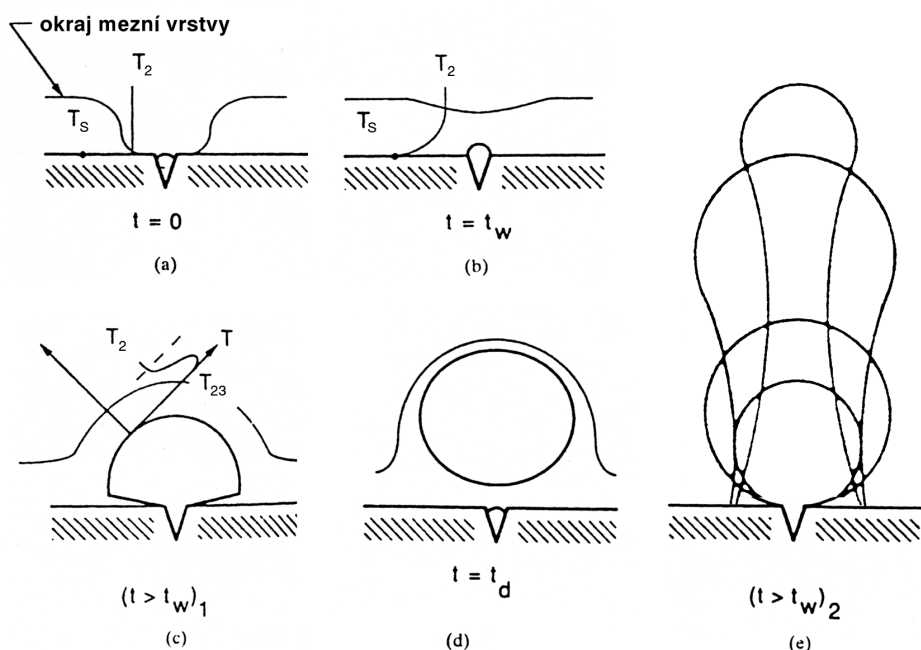
Při popisu vzniku a růstu bublinky se v literatuře obvykle vychází z následující představy. Předpokládejme idealizovanou kulovou bublinu syté páry, která se nachází v objemu přehřáté kapaliny s teplotou T . Bublina musí být v mechanické

i tepelné rovnováze se svým okolím, jinak by se její velikost změnila, buď by rostla nebo by zanikla. Aby byla splněna rovnováha tepelná, musí mít bublina uvnitř stejnou teplotu jako vně bubliny. Aby byla splněna mechanická rovnováha, musí být tlakový rozdíl mezi vnitřkem a vnějškem bubliny vyrovnán povrchovým napětím. Při teplotě T , kterou má okolní kapalina, by byla za stejného tlaku jako vně bubliny uvnitř bubliny pára přehřátá. Protože ale uvnitř bubliny je tlak vyšší právě o hodnotu povrchového napětí, bude v bublině pára sytá. Za těchto předpokladů byl odvozen Young-Laplaceův vztah pro poloměr rovnovážné bubliny:

$$p_3 - p_2 = \frac{2\sigma}{r} \quad (3)$$

kde p_3 a p_2 je tlak kapaliny a tlak nasycené páry, σ je povrchové napětí a r je poloměr rovnovážné bublinky.

Překročením teploty sytosti v mezní vrstvě kapaliny obklopující parní jádro dojde k porušení rovnováhy a k bouřlivému růstu objemu bublinky způsobenému silnou kladnou zpětnou vazbou vyvolanou poklesem kapilárního tlaku. Pokles tlaku vyvolá odpaření kapaliny na mezifázovém rozhraní a tím další zvětšení poloměru parní bubliny a další pokles tlaku uvnitř bubliny. Poloměr, při kterém dojde k odtržení bublinky od povrchu, je dán rovnováhou vztlakové síly a sil povrchového napětí. Uvedený děj růstu parní bublinky má při dostatečném přehřátí explozivní charakter a bublinka změní v čase řádově setiny sekundy svůj objem až o devět řádů. Podrobný popis probíhajících dějů je uveden v dizertační práci a názorně je nakreslen na obrázku 2.



Obr. 2 Vznik a vývoj parní bublinky na teplosměnném povrchu, a) stav po odtržení bublinky, b) obnovení mezní vrstvy, c) růst bublinky, d) odtržení, e) formování bublinky při dostatečném přehřátí teplosměnného povrchu

2.3. AE při varu kapalin

Využití akustické emise pro diagnostiku varu kapalin je v kontextu aplikací AE velmi okrajové. Žádná z monografií věnovaných AE [14], [21] se o varu kapalin nezmiňuje. V přehledu [5] zahrnujícím významné publikace o AE od roku 1950 do roku 1979 bylo o varu kapalin 21 příspěvků. Všechny bez výjimky se zabývaly pouze varem ve velkém objemu v podchlazené kapalině a hlavní zájem byl soustředěn na indikaci varu sodíku v nukleárním reaktoru (T.T.Anderson, A. Bret, B. Woodward a další). Varem vody (a také sodíku) ve velkém objemu se soustavně zabýval pouze R.F.Saxe v letech 1969 až 1972, který v této době publikoval cca 10 článků, zabývajících se danou tematikou [20]. Jako snímač používal nejčastěji širokopásmový hydrofon. V České republice byla v této době (1975) v rámci státního úkolu SVÚSS Běchovice „Výzkum kritických tepelných toků za stacionárních a nestacionárních podmínek – P09-124-005-04/1“ obhájena disertační práce ing. J. Lišky „Zjišťování varu vody v jaderném reaktoru na základě měření a vyhodnocení signálu akustické emise“ zabývající se metodami rozpoznávání stádia varu v podchlazené kapalině ze signálu AE [13].

Nemnoho novějších publikací zabývajících se akustickými projevy varu (V.I. Tolubinsky, A.M. Kitchigin, S.G. Povsten, N. I. Kobasko, A. A. Moskalenko, G. E. Totten, G. M. Webster, J. S. Sitter, T. J. Snyder, J. N. Chung a další) se věnuje sledování varu v podchlazené kapalině v nízkofrekvenčním kmitočtovém pásmu, vnějšími projevy varu bez hlubší analýzy jevu, příp. se věnuje generování akustického signálu při prudkém ochlazení teplosměnného povrchu - kalení. V současné době mi není známo žádné pracoviště, které by se soustavně zabývalo využitím AE pro diagnostiku varu kapalin, tím méně varu v tenké vrstvě.

3. CÍL PRÁCE

Záměrem práce je ověřit vznik akustické emise (AE) při varu kapalin ve velkém objemu a v tenké vrstvě. Dalším cílem je experimentálně ověřit správnost navrženého modelu vzniku AE při varu kapalin. Na základě provedeného teoretického rozboru, navrženého modelu vzniku AE a praktických měření nalézt nejvhodnější parametry, příp. sadu parametrů signálu AE, které budou nejlépe informovat o přehřátí teplosměnného povrchu, tzn. o hustotě tepelného toku procházejícího z teplosměnného povrchu do kapaliny, příp. změně součinitele přestupu tepla zkoumaného povrchu. Na rozdíl od většiny publikovaných prací však bude v případě varu ve velkém objemu sledován signál nikoli vazbou přes kapalinu, ale kontaktně přímo na teplosměnném povrchu v bezprostřední vzdálenosti od místa vzniku parních bublin. Tím bychom měli zvýšit citlivost metody na AE generovanou růstem parního jádra a potlačit vliv imploze bublinky v nedohřáté kapalině. V případě varu v tenké vrstvě potom můžeme porovnat měření provedená kontaktním a bezkontaktním širokopásmovým snímačem.

4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

4.1. Návrh modelu vzniku AE

Akustická emise při varu kapalin vzniká při bouřlivém růstu stěny varného jádra, při odtržení bubliny od povrchu a v případě varu podchlazené kapaliny ve velkém objemu při kolapsu parní bubliny. Teoretický popis s výjimkou posledního případu mi není znám a proto jsem se pokusil o vlastní návrh modelu zdroje AE. Při návrhu jsem vycházel ze vztahů publikovaných v souvislosti s mechanismem vzniku, růstu a případně kolapsu parní bublinky ve velkém objemu uvedených v literatuře věnující se varu kapalin [3], [4], [8].

Mechanismus vzniku tlakové vlny (AE) při růstu bublinky je následující. Při růstu stěny parní bubliny po překročení kritického poloměru dochází k rychlému poklesu vnitřního kapilárního přetlaku $p_3 - p_2$ uvnitř bublinky z hodnoty dané rov.3 pro kritický poloměr na řádově nižší hodnotu odpovídající maximálnímu poloměru při odtržení od povrchu.

Současně však na pohybujícím se rozhraní pára-kapalina (stěna bublinky) dochází ke skokové změně uvedeného tlaku. Tato tlaková změna, resp. působící síla vyvolá na teplosměnném povrchu mechanické napětí – elastickou vlnu, která by měla být zachytitelná snímačem AE umístěným na teplosměnném povrchu. Naproti tomu v kapalině by se výše uvedený efekt neměl projevit, příp. pouze jako sekundárně vyvolaná podélná vlna. To by odpovídalo dříve publikovaným závěrům, kdy většina autorů používajících k měření generované AE hydrofony, příp. zvukovody s akustickou vazbou přes zahřívanou kapalinu považuje signál AE v této fázi varu v kapalině s teplotou sytosti za neměřitelný. Rychlost tlakové změny (frekvenční rozsah) je přímo úměrná rychlosti růstu bublinky a tím i přehřátí mezní vrstvy kapaliny. Amplituda potom nepřímo úměrně kritickému poloměru bublinky, tzn. že s rostoucím přehřátím kapaliny by se měla přímo úměrně zvyšovat.

Při odtržení bublinky od povrchu, resp. přetržení parního sloupce (viz. obr.2) bude generovaná tlaková vlna silně závislá na rozložení povrchové teploty v okolí varného jádra. Stoupající bublinka s sebou strhne přehřátou mezní vrstvu z nejbližšího okolí a na její místo vnikne kapalina s teplotou odpovídající maximálně teplotě syté páry, v případě varu v podchlazené kapalině nižší. Ta způsobí ochlazení zbytku parní bubliny a její implozi na rovnovážný (kritický) poloměr. Při kontrakci dojde k inverznímu mechanismu tlakového působení na teplosměnný povrch. Rychlost kontrakce však bude zřejmě pomalejší než růst bublinky, protože bude zpomalována zahříváním stěny zbytku bubliny vlivem kondenzace páry uvnitř – uvolňuje se výparné teplo. Se zvyšováním tepelného toku (přehřátí stěny) se bude rychlost kontrakce dále snižovat, až v krajním případě dojde pouze k pulsaci parního sloupce při největších tepelných tocích u rozvinutého bublinkového varu. Teoretický popis je značně složitý, již nemůžeme provést zjednodušení, za kterých byly odvozeny vztahy pro výpočet rychlosti stěny parního jádra, velikost kritického poloměru a opakovací kmitočet uvolňování bublinek (homogenní rozložení teploty

na teplosměnném povrchu, přestup tepla do mezní vrstvy vedením), kapalina v okolí pulzujícího parního jádra tvoří víry a pohyb má náhodný charakter.

Třetím a energeticky nejvýraznějším zdrojem AE při varu kapalin je imploze parní bubliny v podchlazené kapalině. Mechanismus zániku bubliny je ve srovnání s předchozími případy v literatuře lépe popsán. Ve všech případech se vychází z Rayleighova modelu dynamiky chování sférické dutiny uvnitř nekonečně velkého objemu vyplněného kapalinou. Ochlazením povrchu bublinky se prudce (rychlostí zvuku) sníží tlak uvnitř bublinky na hodnotu odpovídající tlaku nasycené páry a přehřátá pára začne kondenzovat. Rychlost kondenzace páry je v počátečním stádiu zániku bublinky mnohem rychlejší, než rychlost kontrakce bublinky. V okamžiku, kdy se rychlosti vyrovnají, má bublinka poloměr r_{rov} a uvnitř bublinky začne růst tlak. Kinetická energie pohybující se kapaliny se spotřebuje na stlačení zbytku obsahu bublinky nebo, pokud bublinka obsahuje difundovaný plyn, na jeho ohřátí.

V případě kolapsu čistě parní bublinky můžeme psát pro rychlost pohybu stěny parní bublinky vztah odvozený z Rayleighova modelu bubliny, kdy pro rychlost radiálně proudících částic kapaliny platí rovnice kontinuity. Z rovnosti kinetické energie proudící kapaliny a práce vykonané okolním tlakem během imploze lze odvodit vztah pro rychlost pohybující se stěny bublinky :

$$v_s(t) = \sqrt{\frac{2p_2}{3\rho_2} \left(\frac{r_{rov}^3}{r^3(t)} - 1 \right)} \quad (4)$$

kde ρ_2 je hustota kapaliny. Uvedený vztah platí velmi dobře pro první fázi komprese bublinky, kdy je možné považovat probíhající děj za izotermický. Z rovnice je zřejmé, že rychlost stěny parní bublinky v_s se neustále zvyšuje a v limitním případě jde k nekonečnu. To samozřejmě není možné a důvodů je několik. Předně v konečné fázi komprese již děj nelze považovat za izotermický, ale za adiabatický. Kondenzací páry se uvolňuje teplo, které se již nestačí odvádět do okolní kapaliny a dojde k zahřívání stěny bublinky. Tím se zvýší tlak nasycených par a dojde ke snížení rychlosti. Dalším důvodem je stejně jako při růstu parní bublinky vliv viskozity kapaliny, která rovněž omezuje maximální rychlost proudící kapaliny. Naproti tomu však v rov. 4 zanedbaný vliv povrchového napětí v konečné fázi kompresi urychluje. Pro dobu kolapsu bubliny platí přibližný vztah [2]:

$$t_{MAX} = K \cdot r_{MAX} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{p_2}} \quad (5)$$

kde K je součinitel závislý na poměru tlaku uvnitř a vně bubliny nabývajících hodnot v rozsahu od 0,91 pro prázdnou bublinu až po 1,6 pro rovnost tlaků.

Lze konstatovat, že imploze parní bubliny probíhá velmi rychle a generované tlakové impulzy dosahují značných amplitud, přímo úměrných podchlazení kapaliny a prakticky nezávislých na počátečním poloměru kolabující bublinky.

Na základě provedeného rozboru můžeme generovanou AE považovat za náhodný impulsní proces, nebo lépe za posloupnost impulsů jejichž amplituda, doba trvání i perioda opakování jsou náhodné proměnné. Vzhledem k velkému počtu aktivních varných jader však můžeme celkový charakter signálu AE považovat za spojitý náhodný proces s normálním rozložením (důsledek centrální limitní věty). Této úvaze byl podřízen i výběr vhodných charakteristik procesu.

4.2. Experimentální ověření

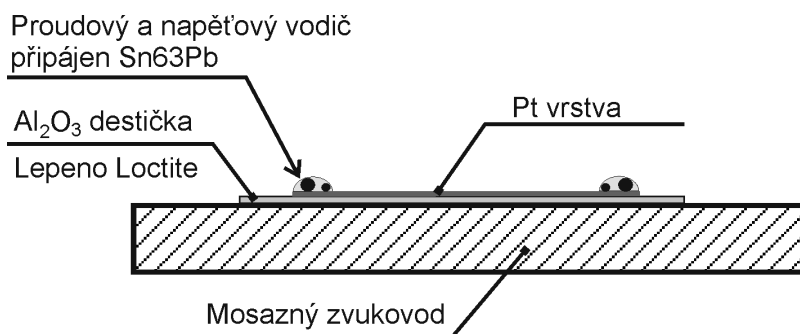
Byla provedena série experimentů, při nichž byl zaznamenán signál AE odpovídající různým kombinacím podmínek experimentu (var ve velkém objemu a v tenké vrstvě, různá teplota kapaliny, úhel sklonu topné vrstvy, různé snímače AE).

Signál AE byl ve všech případech zaznamenáván dvoukanálovým analyzátozem HP 89410A, a to ve formě časového záznamu příp. odhadu spektrální výkonové hustoty. Každý časový záznam byl rozdělen na segmenty s délkou 4096 vzorků a z každého segmentu byly vypočítány charakteristiky – střední hodnota, rozptyl, standardní odchylka, medián, šikmost, špičatost, četnost průchodu signálu nulovou hladinou a četnost průchodu hladinou odpovídající aktuální efektivní hodnotě (standardní odchylce), poměr četností, poměr maximální a efektivní hodnoty, spektrální hustota a výkon signálu ve zvolených frekvenčních pásmech. Průměrováním charakteristik přes všechny segmenty odpovídající jedné realizaci byly získány odhady všech výše uvedených charakteristik. Výsledkem byl vektor charakteristik odpovídajících jedné realizaci. U každého záznamu bylo prováděno odstranění trendu, kontrola náhodnosti rozložení amplitudy signálu a kontrola, zda neobsahuje periodickou složku testem periodicity signálu [22], [25]

4.3. Var ve velkém objemu

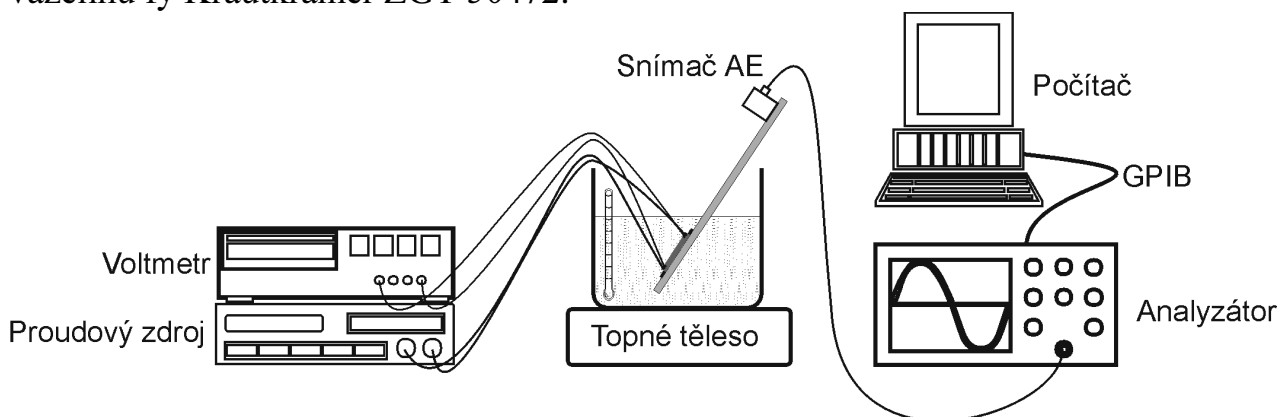
Byl zkoumán signál AE zachycený kontaktními snímači vznikající při varu v kapalině s teplotou 20°C a 100°C šířící se teplosměnným povrchem.

Uspořádání experimentu je patrné z *obr. 4*. Na mosazné destičce – zvukovodu o rozměrech 20x5x200 mm je přitmelena vysokoteplotním lepidlem Loctite 326 keramická podložka o rozměrech 5,11x33,3 mm a tloušťce 0,66 mm se sníženou tepelnou vodivostí a s napařenou platinovou vrstvou. Platinová vrstva má rozměry 5x18 mm a odpor 1Ω při teplotě 0°C. K této vrstvě jsou připájeny proudové a napěťové vodiče, viz. *obr.3*.



Obr.3: Uspořádání zdroje tepelného toku

Proud byl nastavován prostřednictvím stabilizovaného zdroje MN 40V-10A fy MESIT v rozsahu do 10 A. Úbytek napětí odpovídající nastavovanému proudu a teplotně závislému odporu platinové vrstvy byl měřen multimetrem fy Hewlett Packard HP 34401A. Úbytek napětí na topném elementu byl také porovnáván s referenčním napětím a při jeho prudkém nárůstu (dosažení kritického tepelného toku) byl proudový obvod rozpojen. Generovaná AE byla vedena mosazným zvukovodem ke snímači AE umístěnému na stejné straně jako topný element. Použit byl dotykový širokopásmový snímač UT1000 fy Physical Acoustic Corporation. Snímač byl kontaktován přitlačením pružnou gumou přes vysokoteplotní vazební vazelinu fy Krautkrämer ZGT 50472.

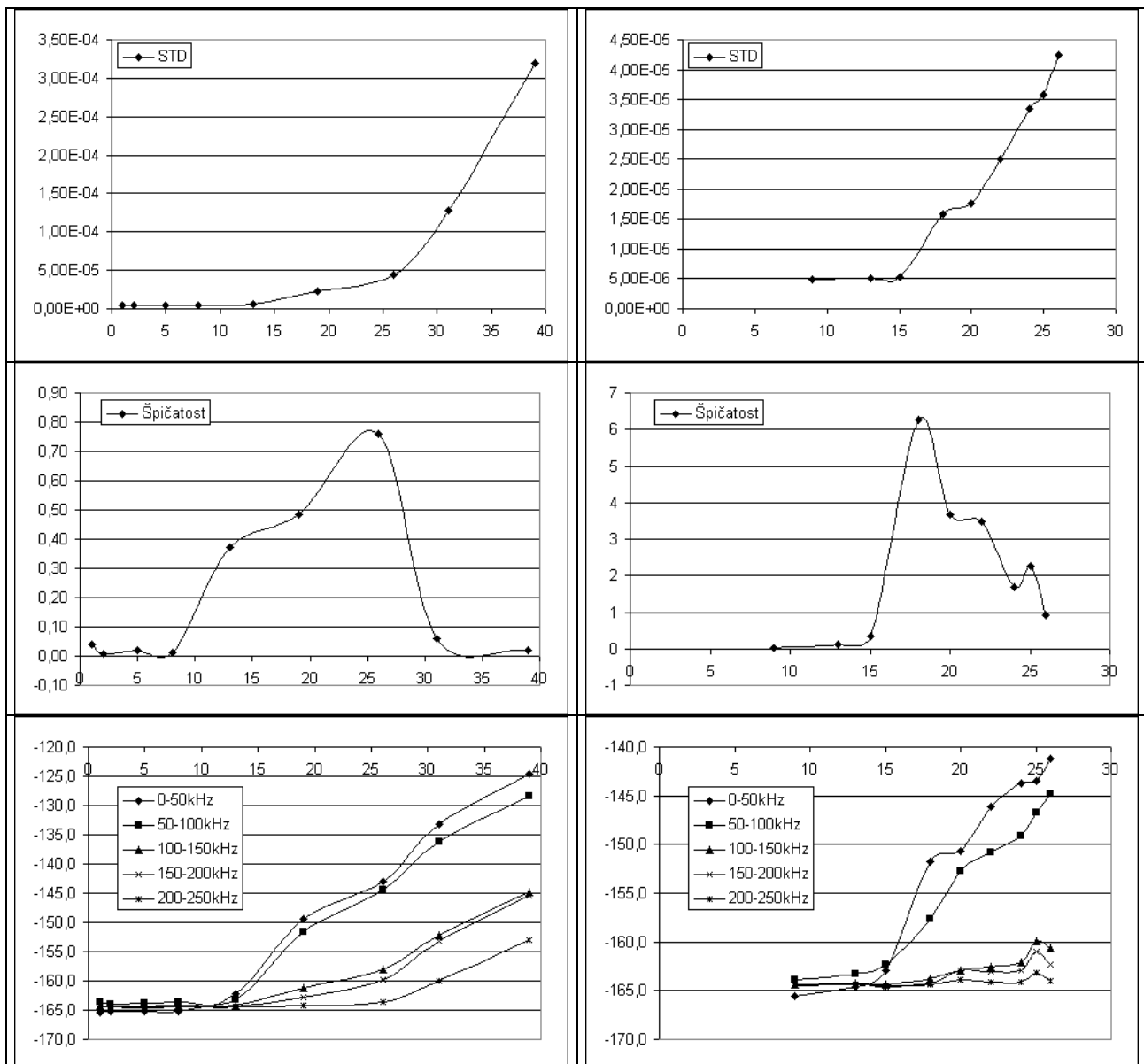


Obr.4: Uspořádání experimentu – var ve velkém objemu

Výstupní signál ze snímače – signál AE byl přiveden na spektrální signálový analyzátor HP 89410A, který umožňuje provést měření ve frekvenční oblasti a rovněž uložit do vnitřní paměti až jeden milion vzorků časového průběhu vstupního signálu pro off-line zpracování. Naměřená data byla po sběrnici GPIB přenesena do počítače k dalšímu zpracování.

Nastavováním proudu procházejícího platinovou vrstvou můžeme plynule regulovat přiváděný příkon měnící se v topné vrstvě na teplo. Vzhledem k tomu, že součinitel přestupu tepla do kapaliny je srovnatelný se součinitelem přestupu tepla do mosazného zvukovodu pouze ve fázi konvektivního přestupu tepla, zatímco při rozvoji varu prudce roste, můžeme považovat ztrátu tepla vedením za zanedbatelnou. Jinými slovy, měřením proudu, úbytku napětí na topné vrstvě a ze znalosti plochy vrstvy můžeme sestrojít funkční závislost hustoty tepelného toku na rozdíl teplot a porovnávat ji s funkčními závislostmi charakteristik generované AE.

Z grafů závislostí a tabulek korelačních koeficientů měřených a vypočítávaných charakteristik uvedených v dizertační práci a na obr. 5 je možné učinit následující závěry pro měřený signál AE při varu kapalin ve velkém objemu. Charakteristiky mající úzký vztah k teplotě teplosměnného povrchu a tím i k intenzitě varu (hustotě tepelného toku) jsou především charakteristiky související s energií signálu - směrodatná odchylka, výkon ve frekvenčních pásmech a v inverzní závislosti potom četnost průchodu signálu zvolenou hladinou.



Obr. 5 Závislost vybraných charakteristik varu ve velkém objemu na přehřátí teplosměnného povrchu pro kapalinu s teplotou 20 °C (vlevo) a 100 °C (vpravo)

Na počátek varu lze velmi dobře usuzovat z prudkého nárůstu špičatosti rozdělení nebo jednodušeji měřitelného nárůstu poměru maximální a efektivní hodnoty signálu AE, příp. poklesu poměru četnosti průchodu signálu AE nulovou úrovní a úrovní odpovídající efektivní hodnotě, což by se dalo snadno zdůvodnit výskytem impulzní emise vznikající v důsledku malého počtu aktivních parních jader. Tento vliv je zejména patrný při varu kapaliny s teplotou na mezi sytosti, kdy je vznik varu velice bouřlivý, což koresponduje s průběhem příslušného koeficientu. Stejným způsobem bychom mohli vysvětlit i výrazný pokles četnosti průchodu signálu AE nulovou úrovní a úrovní odpovídající efektivní hodnotě.

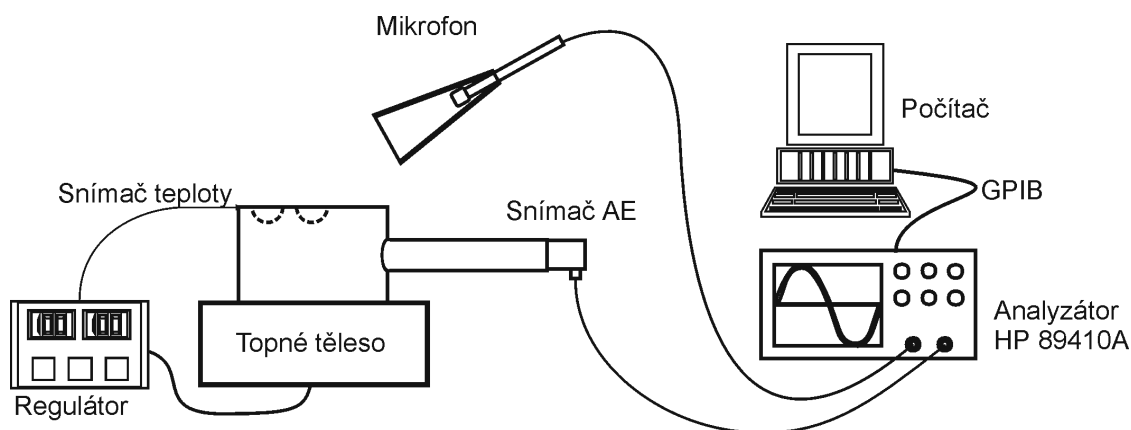
Porovnáme – li signál generovaný při varu kapaliny s teplotou 20 °C a 100 °C, lze pozorovat ve sledovaných parametrech minimální odchylky. Poněkud zarážející je to v případě výkonových charakteristik, kdy zřejmě nárůst intenzity signálu AE způsobený vyšší frekvencí tvorby bublinek (zkrácení doby potřebné k přehřátí mezní

vrstvy) kompenzuje tu část signálu AE vznikající kolapsem bublinky v nedohřáté kapalině. Přesto je zřetelný pokles na vyšších kmitočtech - to by souhlasilo s faktem, že generované frekvenční spektrum při kolapsu bublinky v nedohřáté kapalině zasahuje do vyšších kmitočtů (větší rychlost stěny ve volné kapalině) než spektrum generované při vzniku bublinky na teplosměnném povrchu, kdy jsou probíhající děje pomalejší.

4.4. Var v tenké vrstvě

Var v tenké vrstvě byl simulován odpařováním kapky z vyhřátého povrchu. Analyzován byl signál AE zachycený kontaktními i bezkontaktními snímači.

Var v tenké vrstvě byl simulován na přípravku dle obr.6. Duralový blok válcového tvaru o průměru 89 mm a výšce 53 mm byl umístěn na zdroj tepla o výkonu 900W. Do duralového bloku byl zatepla nalisován zvukovod ze stejného materiálu o průměru 20 mm a délce 205 mm. Na jeho konci byl přes vysokoteplotní vazelínu akusticky navázán dotykový širokopásmový snímač SAE 30 fy Technická akustika, příp. snímač UT1000 fy Physical Acoustic Corporation. V ose duralového bloku byla vyhloubena jamka půlkulového tvaru s průměrem 20 mm a s leštěným povrchem a vedle ní druhá se stejným průměrem, ale s uměle zdrsňeným povrchem.



Obr. 6 Uspořádání experimentu – var v tenké vrstvě

Generovaná AE vznikající při kápnutí kapky vody s definovaným objemem do jednoho z důlků byla snímána také bezdotykovým snímačem – širokopásmovým mikrofonom 4135 fy Brüel&Kjær s nominálním frekvenčním rozsahem 100 kHz. Při prvních zkouškách byl zjištěn výskyt parazitních harmonických kmitočtů způsobených hlukem větráku analyzátoru. Na mikrofon byl proto nasazen zvukovod, který zúžil směrovou charakteristiku snímače a významně omezil parazitní signál.

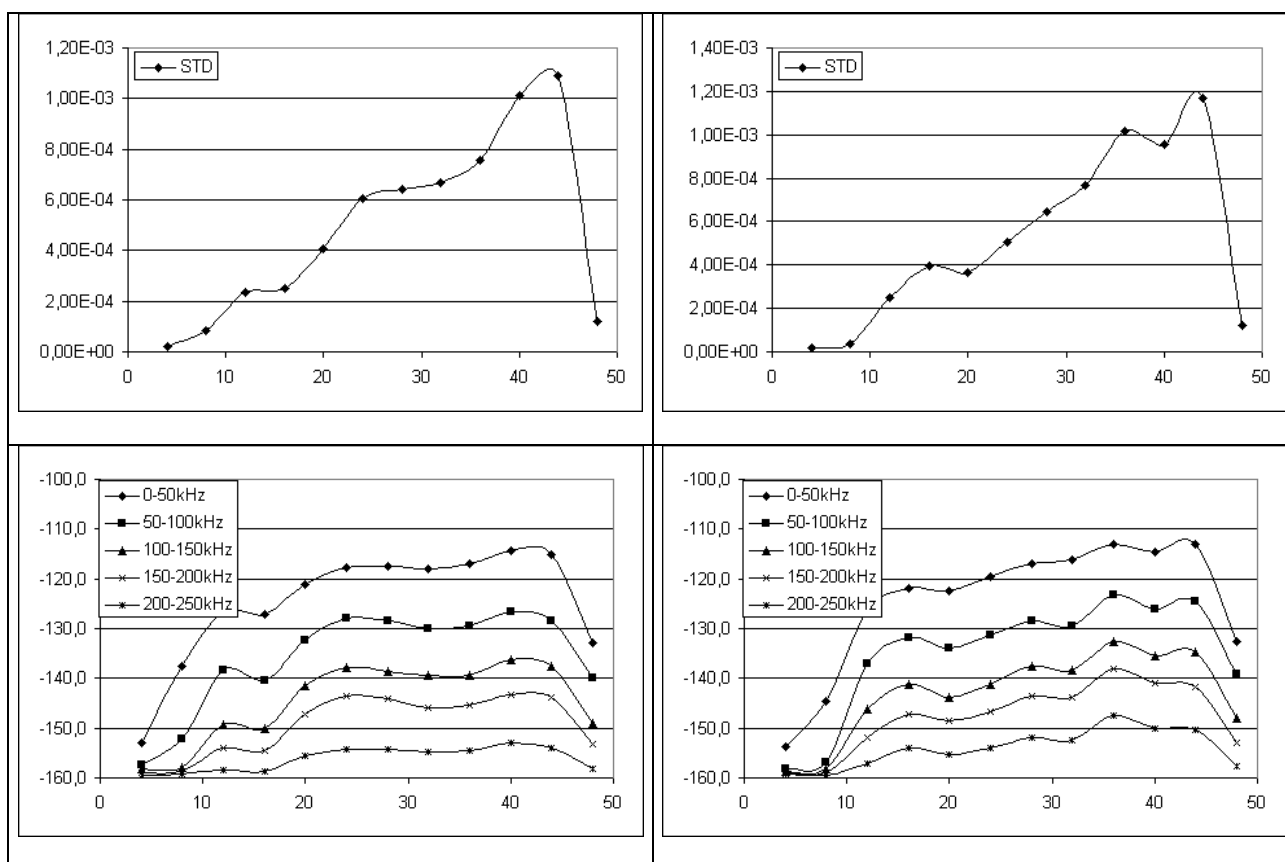
Narozdíl od varu ve velkém objemu lze v případě varu v tenké vrstvě považovat teplotu teplosměnného povrchu za nezávisle proměnnou a bez větších problémů lze nastavit teplotu odpovídající libovolné fázi varu včetně krize varu a přechodné fáze. Měřením doby potřebné k odpaření kapky a ze znalosti počáteční teploty kapky a jejího objemu můžeme snadno vypočítat dodanou energii. Bohužel je však velmi

obtížné realizovat var v tenké vrstvě na definované a konstantní ploše, proto můžeme provést pouze relativní odhady hustoty tepelného toku.

Byl zaznamenán signál AE odpovídající různým podmínkám experimentu – různá teplota kapky, různá kvalita teplosměnného povrchu (leštěný, hrubě opracovaný, pokrytý vrstvičkou silikonové vazelíny), různé snímače AE. Signál byl zaznamenán v časové oblasti i ve frekvenční oblasti a zpracován obdobným způsobem jako signál AE odpovídající varu ve velkém objemu.

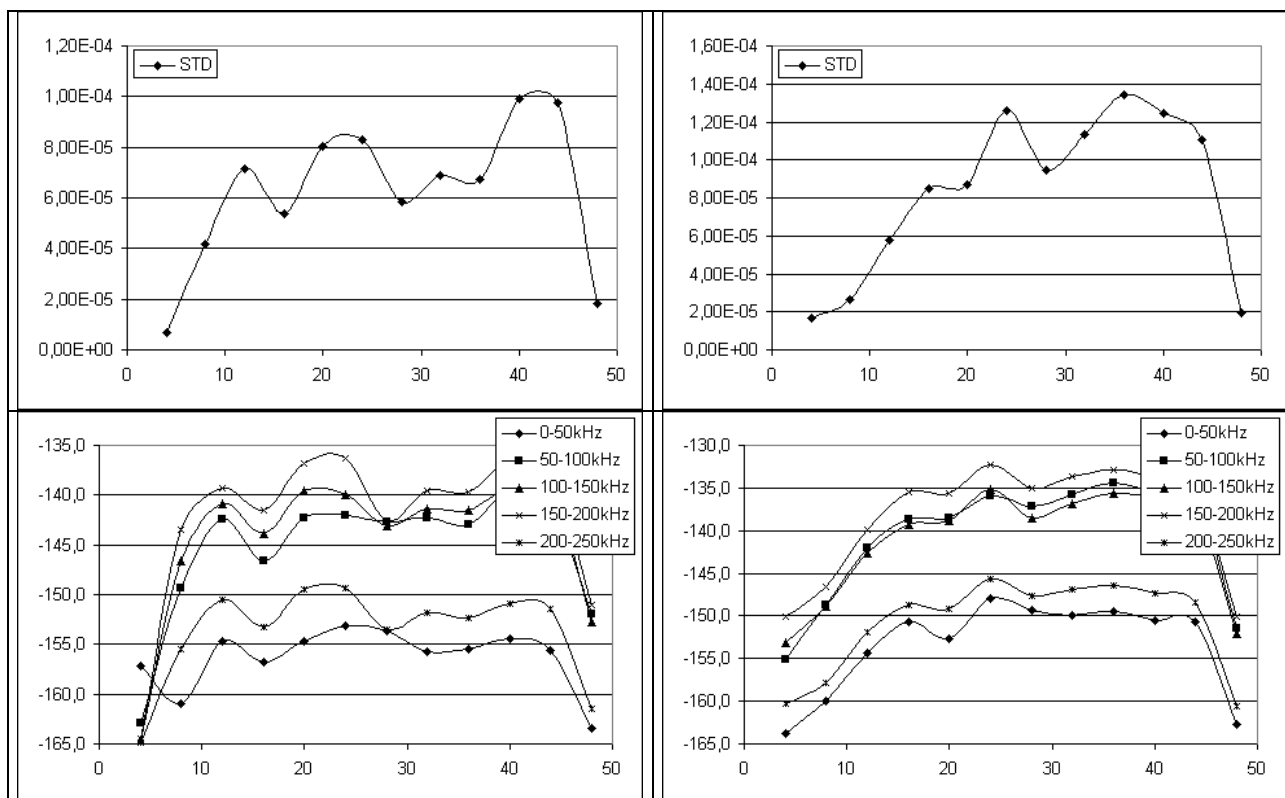
Obrázky a grafické závislosti na *obr. 7* a *obr. 8* představují data získaná z časového záznamu experimentů, kdy parametrem byl typ povrchu (hrubý, hladký) a typ snímače (bezdotykový, dotykový). Teplota kapky byla 100 °C.

Pro první dva provedené experimenty (bezdotykový snímač, hladký a hrubý povrch) lze pozorovat prakticky totožné charakteristiky. Podobně jako v případě varu ve velkém objemu odpovídá nárůst směrodatné odchylky, příp. výkonu ve frekvenčních pásmech nárůstu teploty teplosměnného povrchu. Velmi zajímavý je výrazný pokles výše uvedených charakteristik při překročení kritického tepelného toku, tzn. přechod z fáze rozvinutého bublinkového varu k fázi přechodného varu. Fáze přechodného varu je podobně jako vznik varu indikována také změnou charakteristik spojených s impulsním charakterem signálu AE – nárůst špičatosti rozložení, příp. pokles poměru četností průchodu signálu nulovou hladinou a hladinou odpovídající efektivní hodnotě.



Obr. 7 Vybrané charakteristiky varu v tenké vrstvě pro hladký (vlevo) a hrubý (vpravo) povrch, bezkontaktní snímač

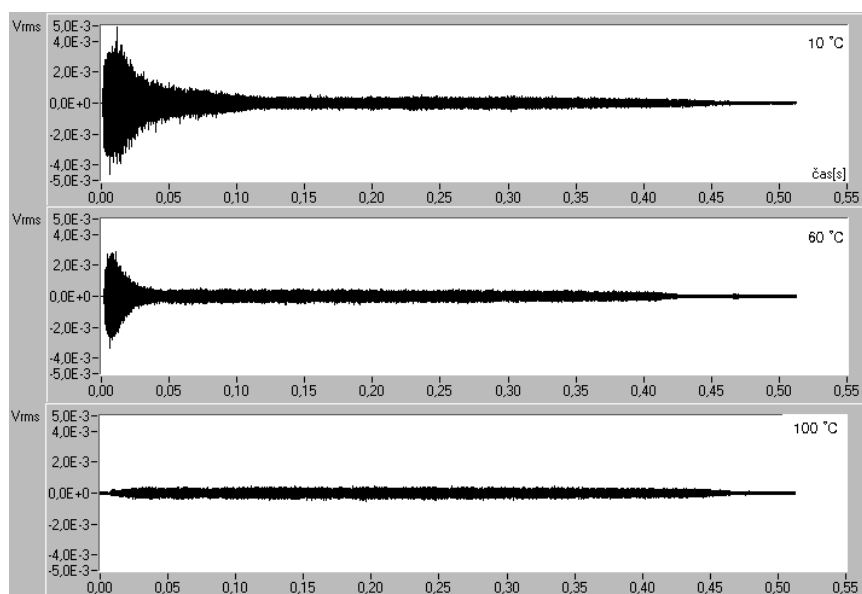
Pro další dva provedené experimenty (kontaktní snímač, hladký a hrubý povrch) jsou závislosti na přehřátí méně výrazné, opět lze ale konstatovat vhodnost využití směrodatné odchylky a výkonu ve frekvenčních pásmech. Přechod přes krizi varu je opět indikován poklesem intenzity signálu, tentokrát však bez výraznějších projevů v špičatosti rozdělení, příp. poměru četností. Rovněž tak vývoj odhadu spektrální výkonové hustoty ve zvolených frekvenčních pásmech nevykazuje výrazné trendy.



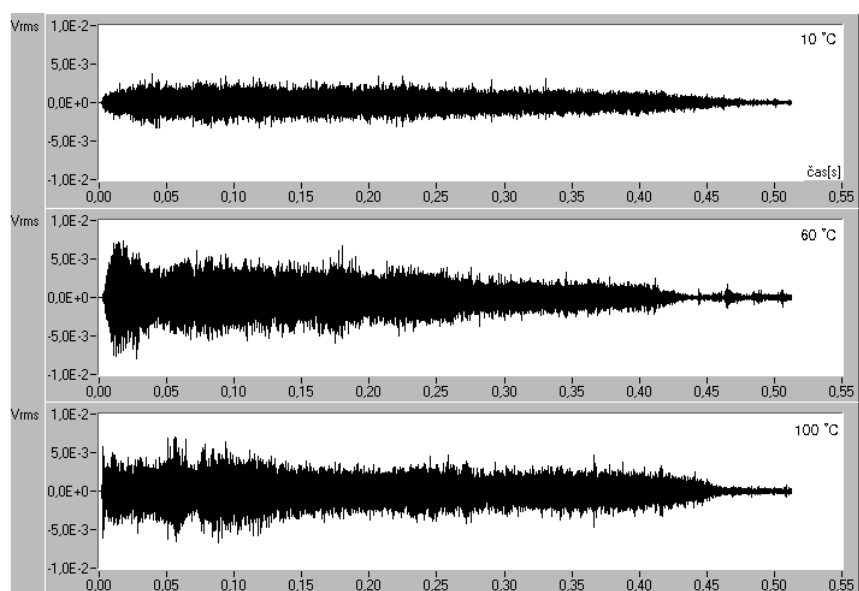
Obr.8 Vybrané charakteristiky varu v tenké vrstvě pro hladký (vlevo) a hrubý (vpravo) povrch, kontaktní snímač

Obr. 9 a Obr. 10 zachycují vývoj signálu AE a sledovaných charakteristik v časové oblasti v závislosti na čase pro tři různé teploty kapky: 10 °C, 60 °C, 100 °C. Signál byl měřen bezdotykovým i kontaktním snímačem. Teplota teplosměnného povrchu byla 130 °C. Zřetelně je rozeznatelný vliv signálu AE vznikajícího při kolapsu bublinky v podchlazené kapalině měřený kontaktním snímačem (viz. obr. 9) a pokles jeho amplitudy s rostoucí teplotou kapky.

Poměr časových intervalů potřebných na ohřátí kapky a její odpaření velmi dobře odpovídá poměru odpovídajících energií ($c_p (T_{23} - T_2)/l_{23}$). Stejné experimenty zaznamenané bezkontaktním snímačem jsou na obr.10.



Obr. 9. Časový záznam odpaření kapky s různou počáteční teplotou zaznamenaný kontaktním snímačem UT1000 fy PAC.



Obr. 10. Časový záznam odpaření kapky s různou počáteční teplotou zaznamenaný bezkontaktním snímačem BK4135 fy Brüel&Kjær .

Z uvedených závislostí lze usuzovat na zajímavou skutečnost – energeticky nejvýznamnějším zdrojem signálu AE v režimu měření bezkontaktním snímačem není imploze bublinky v nedohřáté kapalině, jako tomu bylo u kontaktního snímače, ale až puknutí bublinky na povrchu kapky a uvolnění tlakové vlny jejíž amplituda je dána poloměrem bublinky neboli kapilárním tlakem. Tomu by odpovídal i záznam časového průběhu, kdy amplituda signálu AE generovaná kapkou o teplotě 20 °C narůstá mnohem pomaleji než u kapky s teplotou 100 °C, kdy dosáhne maximální hodnoty prakticky okamžitě.

5. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Z naměřených závislostí byly učiněny následující závěry pro měřený signál AE při varu kapalin ve velkém objemu. Charakteristiky mající úzký vztah k teplotě teplosměnného povrchu a tím i k intenzitě varu (hustotě tepelného toku) jsou především charakteristiky související s energií signálu - směrodatná odchylka, výkon ve frekvenčních pásmech a v inverzní závislosti potom četnost průchodu signálu zvolenou hladinou.

Na počátek varu lze velmi dobře usuzovat z prudkého nárůstu špičatosti rozdělení nebo jednodušeji měřitelného nárůstu poměru maximální a efektivní hodnoty signálu AE, příp. poklesu poměru četnosti průchodu signálu AE nulovou úrovní a úrovní odpovídající efektivní hodnotě, což by se dalo snadno zdůvodnit výskytem impulzní emise vznikající v důsledku malého počtu aktivních parních jader. Tento vliv je zejména patrný při varu kapaliny s teplotou na mezi sytosti, kdy je vznik varu velice bouřlivý. To koresponduje s průběhem příslušného koeficientu.

Pro var v tenké vrstvě odpovídá nárůst směrodatné odchylky, příp. výkonu ve frekvenčních pásmech nárůstu teploty teplosměnného povrchu. Velmi zajímavý je výrazný pokles výše uvedených charakteristik při přiblížení se ke kritickému tepelnému toku. Fáze přechodného varu je podobně jako vznik varu indikována změnou charakteristik spojených s impulsním charakterem signálu AE – nárůst špičatosti rozložení, příp. pokles poměru četností průchodu signálu nulovou hladinou a hladinou odpovídající efektivní hodnotě.

Z časových záznamů signálu získaných bezkontaktním snímačem při varu v tenké vrstvě lze usuzovat na zajímavou skutečnost – energeticky nejvýznamnějším zdrojem signálu AE v režimu měření bezkontaktním snímačem není imploze bublinky v nedohřáté kapalině, jako tomu bylo u kontaktního snímače, ale až puknutí bublinky na povrchu kapky a uvolnění tlakové vlny, jejíž amplituda je dána poloměrem bublinky neboli kapilárním tlakem.

K vedlejším výsledkům dizertační práce patří podrobné zpracování problematiky kalibrace snímačů akustické emise a vybudování pracoviště umožňujícího kalibrace provádět, vytvoření rozsáhlého balíku programů a knihovných funkcí dovolujících efektivní zpracování obecných signálů a v neposlední řadě vytvoření ovladače pro analyzátor HP89410A.

6. ZÁVĚR

Těžiště práce spočívá v návrhu modelu generování AE při varu kapalin na základě předchozího teoretického rozboru a v jeho ověření. Podařilo se nalézt parametry signálu AE mající úzký vztah k přehřátí teplosměnného povrchu, tzn. i k procházejícímu tepelnému toku. Experimentálně byl potvrzen předpoklad, že signál AE nese informaci o probíhajících dějích a lze jej využít k predikci krize varu. Byly sledovány tyto parametry signálu AE - střední hodnota, rozptyl, standardní odchylka, medián, šikmost, špičatost, četnost průchodu signálu nulovou hladinou a četnost průchodu hladinou odpovídající aktuální efektivní hodnotě (standardní odchylce), poměr četností, poměr maximální a efektivní hodnoty, spektrální výkonová hustota a výkon signálu ve zvolených frekvenčních pásmech.

V případě varu ve velkém objemu je nejlepším indikátorem vzniku varu prudký nárůst špičatosti náhodného rozdělení, příp. jednodušeji měřitelného poměru maximální a efektivní hodnoty signálu AE. Intenzita varu v oblasti bublinkového varu je potom v časové oblasti úzce svázána s nárůstem směrodatné odchylky náhodného signálu, příp. jednodušeji měřitelné efektivní hodnoty nebo ve frekvenční oblasti s vývojem výkonové spektrální hustoty. Krize varu je potom spojena s prudkým poklesem uvedených charakteristik.

Var v tenké vrstvě byl dle provedeného literárního průzkumu systematicky sledován metodou akustické emise vůbec poprvé. Byl použit kontaktní i bezkontaktní snímač. Jako vhodnější se ukázal snímač bezkontaktní, na intenzitu a fáze varu lze nejlépe usuzovat ze stejných charakteristik jako u varu ve velkém objemu.

Byl navržen a realizován experimentální přípravek umožňující v laboratorních podmínkách dosahovat tepelné toky blížíící se kritické hodnotě $1,6 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ a současně monitorovat kontaktně i bezkontaktně vznikající AE při varu ve velkém objemu a v tenké vrstvě.

V rámci prováděných prací bylo vybudováno pracoviště umožňující automatizované provádění kalibrace snímačů akustické emise.

7. ABSTRACT

7.1. INTRODUCTION

The doctoral thesis deals with the application of the acoustic emission method in analysis of processes taking place on a heat transfer surface in heating and in pool and microlayer boiling. There is a wide range of practical applications, the AE method being one of the few methods of identifying the initiation of boiling. An early prediction of the crisis of boiling would make it possible to significantly increase the coefficient of safe heat flux density and therefore the efficiency of heat exchangers.

7.2. STATE-OF-THE-ART

The thesis is based on a detailed literature research. Electronic research databases of the firms SilverPlatter and Bell+Howell (INSPEC, Dissertation Express, ProQuest Databases, Compendex etc.), databases of NASA reports, citation index databases, library funds of the Moravian Regional Library Brno, National Research Library Prague, Delft University of Technology Library, the Netherlands, University of Huddersfield Library, Great Britain, patent research using patent servers, ASTM standards and recommendations, Journal of Heat Transfer, International Journal of the Heat and Mass Transfer, Journal of Fluid Mechanics, Journal of Physics, Canadian Journal of Physics, The Journal of the Acoustical Society of America, Journal of Acoustic Emission, Defektoskopija, and the Czech NDT bulletin.

Acoustic Emission

Acoustic emission (hereafter AE) is a category of phenomena accompanied with single generation of elastic waves following a sudden release of energy accumulated at a single site in the material.

The AE method has been intensively developed since the early 1950s. The main application area of AE is the diagnosis and monitoring of technological processes. The focus area of the method is the mechanism of AE generation, the propagation, suppression and dispersion of elastic waves, the sensor design and its calibration, the AE source location, the measuring device design, the AE signal evaluation and interpretation, and the source type identification.

Boiling of Liquids

Regarding the close relationship between the boiling of liquids and an optimum design of heat exchangers, this area has been widely studied, and a large number of articles, reports, papers, monographies and manuals have been published. Detailed studies have been devoted to the heat transfer relationship to the pressure, structure and position of the heat transfer surface, the hydrodynamic and chemical parameters of the heated liquid, and many other parameters. And yet the theoretical studies of the problem have not been completed. Because of its intricacy many of the presented and used relationships are based on experimental and empirical data. Bubble

nucleation in pool boiling, which is of the greatest importance for practical use, has been in the focus of attention.

Microlayer boiling has been studied only marginally. The published data are scarce. It is of technological importance in spray cooling, in vapour generators with immediate output, in rocket jets cooling, fuel evaporation in injection engines etc. A significant application is the cooling of a nuclear reactor in case of a primary circuit accident.

AE in Boiling

The application of AE for the diagnosis of boiling is only marginal as compared with other AE applications. Boiling is not mentioned in any of the monographies on AE. M.F.M.Osborne and F.M.Holland were most probably the first to mention the parameters of AE generated in boiling in The Journal of the Acoustical Society of America in 1947. Later on, AE generation in pool boiling was studied e.g. by T.T.Anderson, A.Bret, B.Woodward, R.F.Saxe, S.G.Povsten, G.E.Totten, G.M.Webster, J.S.Sitter, T.J.Snyder and J.N.Chung. They focused on the identification of sodium boiling in a nuclear reactor. The wide-band hydrophone was most frequently used as a sensor. In the Czech Republic, the doctoral thesis of Ing.J.Liška 'Identification of water boiling in a nuclear reactor based on the measurements and evaluation of the AE signal' dealing with the methods of identification of the phase of boiling in a subcooled liquid based on the AE signal has been published.

To date I have no information about a workplace where AE application in the diagnosis and analysis of boiling, and much less microlayer boiling, is studied.

7.3. OBJECTIVES OF THE THESIS

The objective of the thesis is verification of AE generation in bulk and microlayer boiling. Another objective is to verify by experiment the proposed model of AE generation in boiling, and on the basis of a theoretical analysis, the proposed model and measurements to find the parameters, or a set of parameters of AE signal which would best characterize a superheated heat transfer surface, i.e. the heat flux density, or changed heat transfer coefficient. Contrary to most published works, in the present thesis the signal is recorded not through the liquid but directly on the heat transfer surface in the close vicinity of vapour bubbles nucleation. Thus the sensitivity of the method to AE generated in bubble nucleus growth should be increased and the effect of bubble implosion in subheated liquid suppressed. In microlayer boiling the measurements performed using a contact and a contactless wide-band sensor are compared.

7.4. PROCESSING METHODS

AE Generation Model

AE is generated in boiling in the dramatic growth of bubble nucleus wall, in the detachment of the bubble from the surface, and in subcooled pool boiling in the

collapse of vapour bubble. Except for the last one, I have not found a theoretical description of these events and therefore I have attempted to propose my own model of the AE source. I based it on the relationships published on the mechanism of the nucleation and growth of vapour bubble in bulk boiling, found in literature on the boiling of liquids.

The mechanism of a pressure wave generation (AE) in bubble growth is as follows. In the growth of the vapour bubble wall, after reaching the critical radius, there comes a sharp decrease of inner capillary overpressure from the value given by *equation 1* for the critical radius to an on order lower value corresponding to the maximum radius of detachment from the surface. Simultaneously, on the moving interface vapour-liquid (bubble wall) the given pressure value is suddenly changed. The speed of the pressure change (frequency range) is directly proportional to the speed of bubble growth, and thus to the overheating of the boundary layer. Then the amplitude increase should be directly proportional to the overheating of the liquid and indirectly proportional to the critical radius of the bubble.

In the departure of the bubble from the surface or in the breakup of the vapour stem (see *Fig.2*) a pressure wave will be generated strongly dependent on the distribution of surface temperature in the vicinity of the boiling nucleus. The rising bubble takes with it the nearest superheated boundary layer, and its place is taken by liquid whose temperature corresponds to the maximum temperature of saturated vapour, in subcooled boiling a lower temperature. This causes cooling of the rest of the vapour bubble and its implosion to the critical radius. With increasing heat flux (wall overheating) the contraction rate will be coming down until in the extreme the vapour stem will pulse at the highest heat flux in fully developed bubble boiling. The theoretical description is rather complicated. It can be assumed that the liquid in the vicinity of the pulsing vapour nucleus induces swirl and turbulence, and the movement is of random character.

The third and most powerful source of AE in boiling is a vapour bubble implosion in subcooled liquid. In comparison to the previous examples, the mechanism of the collapse of the bubble is better described in literature. The descriptions are based on the Rayleigh dynamic model of the behaviour of a sphere cavity within an infinitely large volume of liquid. When the surface of the bubble is cooled, the pressure inside the bubble is dramatically decreased (at the sound velocity) to a value corresponding to the pressure of saturated vapour, and the superheated vapour is rapidly condensing. In the initial phase the condensation rate is much higher than the bubble contraction. At the instant of rates equalization the pressure inside the bubble starts to increase. The kinetic energy of the moving liquid is used up for contraction of the rest of the bubble or, if the bubble contains diffused gas, for its heating. It can be assumed that a vapour bubble implosion is very fast and the generated pressure pulses reach large amplitudes, directly proportional to subcooling and practically independent on the diameter of the collapsing bubble.

Based on this analysis, the generated AE can be regarded as a random pulse process, or rather a sequence of pulses whose amplitude, length and interval are random variables. In regard to a large number of active boiling nuclei the total AE signal can be described as a continuous random process with standard distribution (consequence of the central boundary theorem).

Verification by Experiment

In a series of experiments AE signals were recorded in various combinations of experiment conditions (pool and microlayer boiling, different temperatures, angles of inclination of the heating layer, roughness of the surface, AE sensors etc.).

The arrangement of the experiment for bulk boiling is seen in *Fig. 4*. A ceramic pad with a steamed platinum film is mounted on a brass plate - an acoustic waveguide. Soldered to this layer are current and voltage conductors, see *Fig. 3*. The decrease in voltage proportional to the set current and temperature-dependent resistance of the platinum film was measured by voltmeter. The generated AE is conducted through the brass plate to the AE sensor located alongside the heating element. The contact wide-band sensor UT 1000 from Physical Acoustic Corporation was used. The output signal from the sensor - an AE signal was conducted to the spectral signal analyzer HP 89410A enabling measurements in the frequency band and storage in internal memory of up to 1 million samples of the input signal time curve for off-line processing. The measured data was transported via the GPIB bus to the computer for further processing using the LabView program.

The microlayer boiling was simulated on a device seen in *Fig. 5*. A duralumin cylinder was mounted on a source of heat. At the end of the acoustic conductor, a contact wide-band sensor was acoustically connected through high-temperature vaseline. In the axis of the cylinder a semi-sphere hole was made, 20 mm in diameter, with smooth surface, and next to it another one of the same diameter, but with artificial rough surface. The AE generated in dropping a drop of water of a defined volume in one of the holes was recorded by contactless sensor - a wide-band microphone 4135 from Bruel&Kjaer with the nominal frequency range of 100 kHz.

The following AE signal parameters were calculated - mean value, dispersion, standard deviation, median, skewness, kurtosis, the acoustic emission count rate at zero level and the acoustic emission count rate at the level of the current effective value (standard deviation), the ratio of the acoustic emission counts, the maximum and effective value ratio, power spectral density and power signal output in the selected frequency bands, correlation coefficients, and the development of the power frequency spectrum in dependence on surface overheating.

7.5. MAIN RESULTS

On the basis of the obtained relationships I arrived at the following conclusions concerning the measured AE signal in pool boiling. The parameters closely related to the heat transfer surface temperature and therefore boiling intensity (heat flux density) are mainly related with the signal energy - standard deviation, output in frequency bands. And inversely the number of active sites.

The initiation of boiling can be well identified by a sharp increase of the kurtosis of distribution or rather more easily measured increase of the maximum-effective value ratio or the decrease of the number of active sites at the zero level and the level of the effective value, which might be explained by the pulse emission due to a low number of active vapour nuclei. This is mainly evident in boiling at the saturation limit temperature when the initiation of boiling is dramatic. This is in agreement with the changes of the appropriate coefficient.

In microlayer boiling the standard deviation increase or output in frequency bands is proportional to the heat transfer surface temperature. The notable decrease of the above characteristics as the critical heat flux is approached is of interest. The transition boiling phase is similarly to the initiation of boiling identified by changes in the characteristics connected with the AE signal pulse - the increased kurtosis of distribution or the decreased ratio of the number of active sites at the zero level and the level of the effective value.

From the time recordings by the contactless sensor in microlayer boiling it can be assumed that the most important source of the AE signal energy in the contactless measurement regime is not the bubble implosion in subcooled liquid as in the case of contact measurement, but the burst of the bubble on the surface of the drop and the release of the pressure wave whose amplitude is given by the radius of the bubble or by the capillary pressure.

7.6. CONCLUSIONS

The focus of the thesis is the proposal of a model of AE generation in boiling based on the previous analysis and its verification. The parameters of the AE signal have been found having close relationship to overheating of heat transfer surface i.e. also to the passing heat. It was confirmed by experiment that the AE signal is the carrier of information on the current processes, and can be used to predict the crisis of boiling.

An experiment has been proposed and carried out to obtain in the laboratory heat fluxes nearing the critical value and simultaneously record contact and contactless generation of AE in pool and microlayer boiling.

8. LITERATURA

- [1] 1997 *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1997. Vol. 03.03 Nondestructive Testing, Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures. ISBN 0-8031-2374-4
- [2] BRDIČKA, M., SAMEK, L. a TARABA, O. *Kavitace*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1981. 336 s. Technická knižnice inženýra.
- [3] CAREY, V.P. *Liquid – Vapor Phase – change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. ISBN 0-89116-836-2
- [4] COLLIER, G. John. *Convective boiling and condensation*. 1st. ed. London: McGraw-Hill, 1972. p. 106-138. ISBN 07-084402-X.
- [5] DROUILLARD, F. Thomas. *Acoustic Emission – A Bibliography with Abstracts*. 1st ed. New York : IFI Plenum Data Company, 1979. p. 782. ISBN 0-306-65179-3
- [6] HAIGH, C.P., PONTER, A.B. Sound Emission from Boiling on a Submerged Wire. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1971, Vol. 49, June, p. 309-313.
- [7] HEJZLAR, R. *Sdílení tepla*. 2. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. 186 s. ISBN 80-01-01011-2.
- [8] HEWITT, F. Geoffrey. Boiling. In ROHSENOW, M. Warren, ed. et al.. *Handbook of heat transfer*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1998. Chapter 15, p. 15.1-15.167. ISBN 0-07-053555-
- [9] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. 2. vyd. Brno: skriptum VUT Brno, 1987, 183 s.
- [10] KABÁT, E. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, skriptum, 1987, 227 s.
- [11] KUNEŠ, J. *Modelování tepelných procesů*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. 424 s. Teoretická knižnice inženýra. ISBN 80-03-00134-X.
- [12] KUTATELADZE, S.S., BORIŠANSKIJ, V.M. *Příručka sdílení tepla*. Přeložil M. Hibš. 1. vyd. Praha : SNTL, 1962, 528s.
- [13] LIŠKA, J. Zjišťování varu vody v jaderném reaktoru na základě měření a vyhodnocení signálu akustické emise. *Kandidátská disertační práce*, Plzeň, Škoda n.p., ZVJE Bolevec, 1975, 120 s.
- [14] MILLER, R.K., McINTIRE, P. *Acoustic emission testing*. 2nd ed. American Society for Nondestructive Testing, 1987, p. 603, Nondestructive Testing Handbook, Vol.5. ISBN 0-931403-02-2
- [15] MILLS, A.F. *Basic Heat and Mass Transfer*. 2nd ed. New Jersey: Prentice – Hall, 1999. ISBN 0-13-096247-3.
- [16] ROHSENOW, M. Warren. Boiling. In ROHSENOW, M. Warren, ed. et al.. *Handbook of heat transfer*. 1st. ed. New York: McGraw-Hill, 1973. Sec. 13, p. 13.1-1.75. ISBN 0-07-053576-0.
- [17] ROHSENOW, M.W. A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids. *Transaction ASME*, 1952, vol. 74, p. 969.
- [18] SAZIMA, M., KMONÍČEK, V. a SCHNELLER, J. *Teplo*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. 592 s. Technický průvodce. Sv. 2. ISBN 80-03-00043-2.

- [19] SAZIMA, M. a kol. *Sdílení tepla*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1993. 720s. Technický průvodce. Sv.78. ISBN 80-03-00675-9
- [20] SAXE, R.F., COTHREN, R.K. The Characteristics of the Acoustical Pulses Emitted by Boiling Bubbles in Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1970, vol. 48, No. 5, Part 2, p.1257-1265.
- [21] SCOTT, I.G. *Basic acoustic emission*. 1st ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1991, p.245, Nondestructive Testing Monographs and Tracts, vol.6., Editor-in-Chief Warren J. McGonnagle. ISBN 2-88124-352-5
- [22] SEDLÁČEK, M. *Zpracování signálů v měřicí technice*. . 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. 234 s. ISBN 80-01-00900-9.
- [23] ŠORIN, S.N. *Sdílení tepla*. Překlad R. Hejzlar a R. Mathon. 1. vyd. Praha : SNTL, 1968. 400s.
- [24] TONG, L.S, TANG,Y.S. *Boiling heat transfer and two-phase flow*. 2nd ed. Washington: Taylor&Francis, 1997. ISBN 1-56032-485-6
- [25] UHLÍŘ, J. a SOVKA, P. *Číslíkové zpracování signálů*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1995. 313 s.
- [26] VACEK, V. a HLAVAČKA, V. *Přenos tepla a hmoty*. 1. vyd. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1990. 193 s. ISBN 80-01-00200-4.

9. CURRICULUM VITAE

Narodil jsem se 4. ledna 1968 v Novém Městě na Moravě. Po absolvování základní školy jsem byl přijat na Střední průmyslovou školu v Jihlavě, kde jsem maturoval v roce 1986. V témže roce jsem byl přijat na Fakultu elektrotechniky VUT v Brně, obor Automatizované systémy řízení. V roce 1991 jsem s vyznamenáním složil státní závěrečnou zkoušku a obhájil diplomovou práci na téma „Měřič akustické emise“. Po absolvování vojenské prezenční služby jsem nastoupil na Ústav automatizace a měřicí techniky jako odborný asistent a současně jsem byl přijat na externí postgraduální doktorské studium. V roce 1995 jsem úspěšně vykonal rigorózní zkoušku a obhájil teze doktorské dizertace na téma „Akustická emise“.

Na svém pracovišti se zabývám měřicí technikou - problematikou snímačů, měření neelektrických veličin, zpracování signálu, měřicími systémy, virtuální instrumentací a problematikou průmyslových sběrnic. Zajišťuji laboratorní a numerická cvičení předmětů Měření neelektrických veličin, Snímače neelektrických veličin a od letošního semestru v celém rozsahu nový předmět Polovodičové a inteligentní snímače.

Jsem autorem nebo spoluautorem asi 50 výzkumných zpráv, příspěvků na konferencích a článků v odborných časopisech. Byl jsem spoluřešitelem několika grantů a výzkumně-vývojových aktivit na mezinárodní i národní úrovni