



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

EXPERIMENTY KRITICKÉHO TEPELNÉHO TOKU

EXPERIMENTS CRITICAL HEAT FLUX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR ŠTAFFA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV SUK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Štaffa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimenty kritického tepelného toku

v anglickém jazyce:

Experiments critical heat flux

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se s problematikou kritického tepelného toku. Zpracování přehledu experimentů zabývajících se kritickým tepelným tokem.

Cíle bakalářské práce:

- 1.Zpracovat rešerši o fyzikálním jevu kritického tepelného toku.
- 2.Zpracovat rešerši experimentů zabývajících se problematikou kritického tepelného toku.

Seznam odborné literatury:

Databáze technických článků ScienceDirect.

Výzkumné zprávy z experimentálních měření krize varu.

Databáze publikací World Nuclear Association.

Databáze publikací International Atomic Energy Agency.

Heřmanský B.: Termomechanika jaderných reaktorů, SNTL Praha:1986

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Suk

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou krize přestupu tepla v aktivní zóně jaderného reaktoru. První část práce je věnována objasnění fyzikální podstaty kritického tepelného toku a jsou zde uvedeny základní pojmy z oblasti termomechaniky a hydrodynamiky. Druhá část se zaměřuje na provedené experimenty v oblasti kritického tepelného toku a jejich popis.

Abstract

The Bachelor's thesis deals with phenomenon of critical heat flux in a core of nuclear reactor. The first part is dedicated to describe physical nature of critical heat flux and basic thermo mechanical and hydrodynamics terms. The second part is dedicated to summarize experimental investigations on critical heat flux and their process.

Klíčová slova

Kritický tepelný tok, krize varu, přenos tepla, dvoufázové proudění

Key words

Critical heat flux, the boiling crisis, heat transfer, two-phase flow

Bibliografická citace

ŠTAFFA, P. *Experimenty kritického tepelného toku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Experimenty kritického tepelného toku“ vypracoval samostatně a v seznamu literatury jsem uvedl všechny použité zdroje.

V Brně dne:

.....

Petr Štaffa

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli při vypracování bakalářské práce nápomocni. Obzvláště děkuji panu Ing. Ladislavu Sukovi za cenné materiály, kontakty a odborné vedení této práce.

Rád bych také poděkoval mé rodině a svým blízkým za všestrannou pomoc a podporu během celého studia.

Obsah

1. Úvod	- 13 -
2. Přenos tepla	- 14 -
2.1 Vedením	- 14 -
2.2 Konvekcí	- 15 -
2.2.1 Jednofázové proudění	- 15 -
2.2.2 Kritéria podobnosti	- 16 -
2.2.3 Nucená konvekce	- 17 -
2.2.4 Přirozená konvekce	- 17 -
2.3 Zářením	- 17 -
3. Dvoufázové proudění	- 18 -
3.1 Bublincový var	- 19 -
3.1.1 Oblast izolovaných bublin	- 19 -
3.1.2 Oblast rozvinutého bublincového varu	- 22 -
3.2 Krize varu prvního druhu	- 22 -
3.3 Krize varu druhého druhu	- 24 -
3.4 Přechodový blánový var	- 24 -
3.5 Stabilní blánový var	- 25 -
3.6 Režimy dvoufázového proudění	- 25 -
4. Experimenty kritického tepelného toku	- 26 -
4.1 Rozdělení experimentů	- 26 -
4.2 Experimenty za ustálených podmínek	- 27 -
4.2.1 Experiment Purdue University	- 27 -
4.2.2 Experimenty KAERI	- 30 -
4.2.3 Experiment JAERI	- 35 -
4.2.4 Experiment NIFS	- 38 -
4.2.5 Experiment Shandong University	- 40 -
4.2.6 Experiment SNU	- 42 -
4.2.7 Experiment LWL	- 44 -
4.2.8 Experiment VUT	- 46 -
4.2.9 Přehled experimentů	- 48 -
4.3 Experimenty za přechodných podmínek	- 50 -
4.3.1 Měření experimentů	- 53 -
5. Závěr	- 55 -
6. Použitá literatura	- 56 -

1. Úvod

Člověk žijící ve 21. století si jen těžko umí představit život bez elektrické energie. Způsobů jak elektrickou energii vyrobit je celá řada. Jedním z ekologických a zároveň nejvíce rozvíjejících se oborů je výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách. Štěpením jaderného paliva v palivových tyčích vniká teplo, které se přenáší do chladicího media. Množství tepla, které se přeneso jednotkou plochy, se nazývá tepelný tok.

Při standardním provozu tlakovodního reaktoru dochází v aktivní zóně k jednofázovému proudění chladiva. V krizových situacích (nedostatečné chlazení aktivní zóny) se může proudění chladiva změnit na dvoufázové – dojde k varu. Při dvoufázovém proudění se zvyšuje hodnota tepelného toku až do mezního stavu – tzn. kritického tepelného toku (KTT). Po dosažení této hodnoty se koeficient přestupu tepla snižuje a prudce se zvyšuje teplota povrchu palivových tyčí. Tento jev může vést až k plastickým deformacím aktivní zóny, což by vedlo ke katastrofálním následkům. Z tohoto důvodu je určení KTT jedním z nejdůležitějších parametrů, které se určují při návrhu reaktoru.

Problematika určování hodnot KTT je značně složitá, neboť závisí na mnoha veličinách jako teplotě chladiva, tlaku, tepelném zatížení paliva, průtokových a geometrických charakteristikách nebo na rozložení neutronů v aktivní zóně [1]. Pro stanovení kritických hodnot tepelného toku se používají jak korelační vztahy, tak experimenty, jejichž výsledky jsou s teoretickými hodnotami srovnávány.

První část této práce se zaměřuje na vlastní podstatu přenosu tepla a KTT, přiblíženou na jaderný reaktor. Druhá pak podává ucelený přehled o provedených experimentech při zkoumání KTT, jejich průběhu a výsledcích.

2. Přenos tepla

Teplu je energie, kterou můžeme využít. Nejrozšířenějším nepřímým využitím tepla je jeho přeměna na kinetickou energii, kterou dále využíváme k výrobě elektrické energie. Cesta od tepla až po vlastní elektrickou energii, která proudí do našich elektrických spotřebičů, je značně dlouhá. Jedním z prvních kroků, které jsou zapotřebí, je teplo, které vznikne například štěpením jádra v palivových tyčích, přenést dále, kde jsme schopni s ním lépe pracovat. V reaktoru probíhají tři základní mechanismy přenosu tepla – vedení, konvekce a záření. V dalších podkapitolách budou popsány jednotlivé mechanismy přenosu tepla a jejich funkce v jaderném reaktoru.

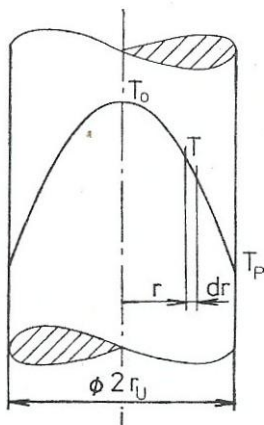
2.1 Vedení

Vedení tepla je v podstatě přenos energie od více nabitých částic k méně nabitým. Základním kamenem vedení tepla je Fourierův zákon, který říká, že měrný tepelný tok \dot{q} , což je celkový tepelný tok \dot{Q} vztažený na jednotku plochy S , přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Konstanta úměrnosti λ [W/mK] je veličina, která se nazývá tepelná vodivost a je to fyzikální vlastnost dané látky. Tepelný tok při vedení se šíří ve směru normály k izotermě. [1]

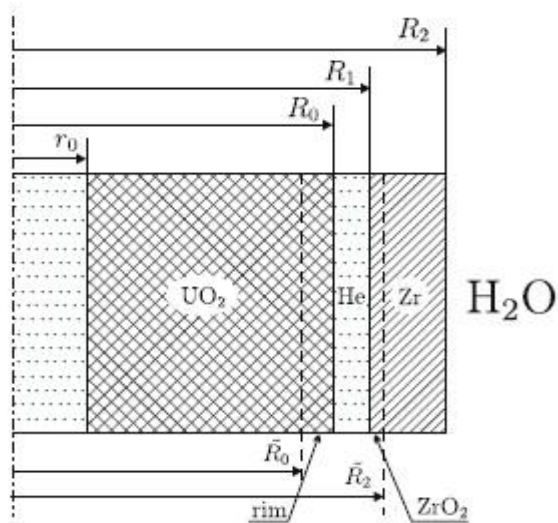
Mechanismus vedení tepla v jaderném reaktoru se uplatňuje přímo v srdci aktivní zóny. To znamená v palivových peletách, které slouží jako palivo pro jaderný reaktor. Pelety jsou naskládány do palivových tyčí. Počet a rozměr pelet v jedné palivové tyči závisí na typu daného reaktoru. Obalová trubka palivové tyče je ve většině lehkovodních reaktorů vyrobena ze slitiny zirkonia. To je kov, který má skvělé vlastnosti pro jaderné štěpení díky svému nízkému účinnému průřezu pro záchyt neutronů a dobré tepelné vodivosti.



Obr. 1 Radiální průběh teplot ve válcové palivové tyči $q_v = \text{konst.}$, $\lambda = \text{konst.}$ [3]

Palivové pelety jsou hermeticky uzavřeny v palivové tyči. Mezi peletami a palivovým článkem je mezera, vyplněná heliem, která slouží jako kompenzační prostor

pro změnu objemu pelet za vysokých teplot a také pro hromadění produktů štěpení. Průřez palivovým článkem je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2 Geometrie palivové tyče, r_0 je poloměr otvoru uprostřed palivové pelety, R_0 je poloměr pelety, \tilde{R}_0 je poloměr krajní vrstvy, R_1 je vnější poloměr mezery, \tilde{R}_2 je poloměr ZrO_2 a R_2 je vnější poloměr Zr [4]

2.2 Konvekce

Přenos tepla konvekcí je složen ze dvou mechanismů. Jedním z nich je konduktce, což je základní náhodný pohyb molekul neboli difúze. Druhým pak je advekce, což je objemový, makroskopický pohyb tekutiny. Konvekce, respektive přenos energie, je důsledkem superpozice těchto dvou mechanismů. Nejtypičtější je přenos tepla konvekcí mezi proudící tekutinou a omezujícím povrchem, pokud mají oba různou teplotu. Pro přenášený měrný tepelný tok platí Newtonův ochlazovací zákon.

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) \quad (2)$$

α je součinitel přestupu tepla a zahrnuje všechny parametry, které ovlivňují konvekci. T_w je teplota povrchu obtékaného tělesa a T_∞ je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu. [1]

V jaderném reaktoru můžeme tento mechanismus nalézt při přenosu tepla z palivové tyče do chladicího media. U lehkovodních reaktorů je tímto mediem demineralizovaná voda. Konvekci můžeme z hlediska charakteru proudění rozdělit na nucenou a přirozenou.

2.2.1 Jednofázové proudění

Jednofázové proudění je charakteristické tím, že proudící kapalina se nachází v jedné své možné fázi. Konkrétním příkladem může být proudění vody, pokud nenastane v objemu kapaliny var. Potom se proudění mění na dvoufázové, tzn. kapalina - plyn.

Pro proudění kapaliny je charakteristické vnější tření, které vzniká při vzájemném pohybu kapalin. V závislosti na rychlosti proudění můžeme proudění rozdělit na laminární a turbulentní.

Laminární proudění nastane při malých hodnotách Reynoldsova čísla. Kapalina se pohybuje po vrstvách, které po sobě kloužou, a částice mezi jednotlivými vrstvami se nemísí.

Naopak turbulentní proudění můžeme pozorovat při větších hodnotách Reynoldsova čísla. Kapalina se pohybuje ve vrstvách, ale na rozdíl od laminárního proudění zde dochází k intenzivnímu promíchávání částic mezi zmíněnými vrstvami.[5]

2.2.2 Kritéria podobnosti

Ze vztahu (2) je patrné, že velikost přenášeného tepelného toku je závislá na součiniteli přestupu tepla α . Velikost tohoto součinitele není jednoduché určit, protože závisí na mnoha parametrech a lze ho psát pro jednofázové proudění ve tvaru:

$$\alpha = f(u, L, \rho, \nu, c, \lambda) \quad (3)$$

kde u je rychlost proudění, L je charakteristický rozměr, ρ je hustota, ν je kinematická viskozita, c je měrná tepelná kapacita a λ je tepelná vodivost. To je celkem 7 veličin, které mají 4 rozměry. Pokud použijeme Buckinghamův π -teorém, vytvoříme 3 nezávislé bezrozměrné π skupiny a to:

$$\pi_1 = Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (4)$$

π_1 je Nusseltovo kritérium – poměr přenosu tepla konvekci a vedením.

$$\pi_2 = Re = \frac{uL}{\nu} \quad (5)$$

π_2 je Reynoldsovo kritérium – poměr setrvačných a vazských sil.

$$\pi_3 = Pr = \frac{\nu \rho c}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (6)$$

π_3 je Prandtlovo kritérium – poměr hybnostní a tepelné difuze. [2]

Pro výpočet potřebného součinitele přestupu tepla se hledá vhodná kritériální závislost z teorie podobnosti. Často se kritériální rovnice upravují do tvaru:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (7)$$

Konkrétní tvar kritériální rovnice je ovlivněn situací, při které dochází k přestupu tepla. Jiný tvar bude pro turbulentní nebo laminární proudění, jiný pro nucenou nebo přirozenou konvekci a podobně. [1]

2.2.3 Nucená konvekce

Mechanismus nucené konvekce je typický pro přenos tepla z palivových tyčí do chladicího média při standardním provozu jaderné elektrárny. Chladivo je pomocí hlavních cirkulačních čerpadel čerpáno do aktivní zóny, kde odebírá teplo z palivových tyčí.

Součinitel přestupu tepla závisí především na Reynoldsovu číslu a Prandltovu číslu. Jedním ze vztahů pro určení součinitele přestupu tepla je vztah Dittusova – Boelterova

$$\alpha = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \frac{\lambda}{d_h} \quad (8)$$

d_h je hydraulický průřez a λ je součinitel tepelné vodivosti. [3]

Palivové tyče v jaderném reaktoru jsou umístěny do svazků. Počet palivových tyčí ve svazku závisí na druhu reaktoru. Mezi jednotlivými palivovými tyčemi jsou umístěny distanční mřížky. Jejich tvar a počet má velký vliv na velikost součinitele přestupu tepla. Pro dosažení spolehlivých výsledků pro návrh parametrů jaderného reaktoru byly prováděny experimenty s různými druhy distančních mřížek, které měly za cíl vyhodnotit jejich vliv na přestup tepla nucenou konvekcí a možnosti zvýšení celkového výkonu volbou správné kombinace a tvaru mřížek.

V práci [6] byl prováděn experiment na svazku tyčí 5x5, chladicím médiem byl vzduch. Vyhodnocení přestupu tepla bylo prováděno na třech různých typech mřížek – standardních, diskových a lopatkových. Z dosažených výsledků vyplývá, že přibližováním distančních mřížek dosáhneme zlepšení přenosu tepla, avšak dojde ke zvýšení poklesu tlaku, což je nežádoucí. Dále bylo zjištěno, že lopatkové distanční mřížky výrazně zlepšují přestup tepla a tím pádem oddalují vznik varu na povrchu palivových tyčí, tím pádem zvyšují hodnotu KTT.

2.2.4 Přirozená konvekce

Při různých havarijních režimech jaderné elektrárny, kdy dojde k výpadku čerpání chladiva do aktivní zóny, je jedním z hlavních mechanismů odebrání vzniklého tepla do chladiva přirozená konvekce.

Pro řešení součinitele přestupu tepla se zavádí nové bezrozměrné číslo – tzv. Rayleighovo číslo

$$Ra = \frac{g\beta l^3}{\nu a} \Delta T \quad (9)$$

kde g je gravitační zrychlení, β je teplotní součinitel objemové roztažnosti tekutiny, ΔT je charakteristický teplotní rozdíl povrchu a teploty látky, l je charakteristický rozměr, a je součinitel teplotní vodivosti a ν je kinematičká viskozita. Hodnota Rayleighova čísla závisí na druhu proudění. Obecně se uvádí mezní hodnota 10^9 , pokud je hodnota Ra menší, jedná se o laminární proudění, pokud je vyšší, jde o proudění turbulentní. [1][3]

2.3 Záření

Dalším mechanismem, kterým lze dosáhnout přenosu tepla, je záření neboli radiace. Elektromagnetické záření umožňuje přenos tepla z jednoho místa na druhé, aniž

by muselo být přítomno zprostředkující medium. Z toho plyne, že přenos tepla lze realizovat i ve vakuu. [1]

Ideální tepelný zářič, kterému říkáme černé těleso, emituje tepelné záření v množství, které je úměrné 4. mocnině absolutní teploty tělesa podle vztahu, který je nazýván Stefan – Boltzmanův zákon:

$$E_0 = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (10)$$

E_0 je zářivost černého tělesa, T je teplota černého tělesa v Kelvinech a σ je Stefan – Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. [1]

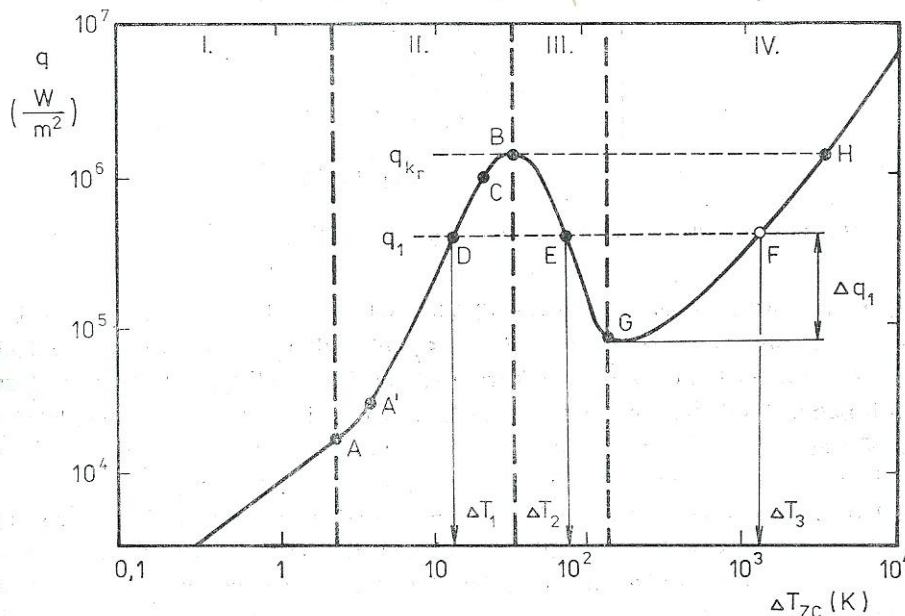
Mechanismus přenosu tepla zářením se v jaderném reaktoru vyskytuje zejména v mezeře mezi peletou a palivovou tyčí.

Při určitých havarijních situacích v jaderném reaktoru (nedostatečné chlazení aktivní zóny apod.) může být záření jediným mechanismem pro odvod zbytkového tepla.

3. Dvofázové proudění

Doposud bylo zmiňováno proudění, kde nedocházelo ke změně fáze. Tento stav je možné pozorovat při standardním provozu tlakovodního jaderného reaktoru. Pokud ale dojde k výpadku chladicích systémů nebo jiné kritické poruše, může se stát, že chladicí medium vlivem prudkého zvýšení teploty začne měnit svoji fázi – dojde k varu. Pro tento režim už nelze použít kritériální rovnici (7) pro výpočet součinitele přestupu tepla.

Závislost mezi hustotou předávaného tepelného toku q a teplotním rozdílem ΔT_{zc} mezi stěnou a chladivem při varu ve velkém objemu je znázorněna na obr. 3.



Obr. 3 Přenos tepla v závislosti na hustotě tepelného toku [3]

Do bodu A je hustota tepelného toku malá natolik, že nedochází ke změně fáze při přestupu tepla. Tuto závislost jsme schopni popsat rovnicí (2). Mezi bodem A a B je oblast bublinkového varu. Po překročení bodu A' var zvyšuje na intenzitě, což znamená lepší cirkulaci a tím pádem lepší přestup tepla. Největší hustotu tepelného toku

zaznamenáváme v bodě B, ve kterém dochází k nejintenzivnějšímu varu. Za bodem B ohřívaný povrch prudce zvyšuje teplotu, avšak hustota tepelného toku klesá. Toto platí pro případ, kdy jsme schopni regulovat změnu teploty topného tělesa. Pokles hustoty tepelného toku lze vysvětlit tím, že se odtrhávající bublinky od povrchu spojují a vytvářejí parní blánu, která izoluje povrch od okolního chladiva, nastává přechodový blánový var. Tento jev nazýváme krizí varu prvního druhu. Při zvyšování teploty povrchu dochází v bodě G opět ke zvratu. Hodnota hustoty tepelného toku roste. Mechanismem přestupu tepla je blánový var a záření. Pro nás je nebezpečný kritický tok q_{kr} v bodě B, kde se mění přestup tepla z bublinkového na blánový var, dochází k prudkému zvýšení teploty povrchu a možné mechanické poškození palivového článku. V praxi je možné při zkoumání chování KTT regulovat pouze tepelný tok, nikoliv teplotu stěny. Z tohoto důvodu se dostáváme skokově z bodu B do bodu H. V následujících podkapitolách bude pojednáno o jednotlivých režimech.[3]

3.1 Bublinkový var

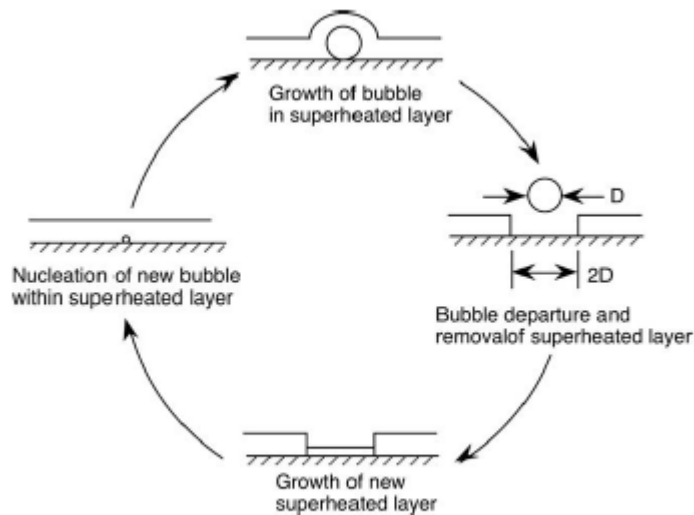
Předpokládaný vznik bubliny na ohřívaném povrchu nastane, když přehřátá kapalná vrstva nad místem vzniku naroste dostatečně široká, aby způsobila, že plyn nebo pára zachycená v kavitách překoná sílu povrchového napětí a dále roste. Kavity na povrchu jsou způsobeny mechanickým obráběním při výrobě. Velikost vytvořené bubliny se nebude zvětšovat ani zmenšovat, protože musí být v mechanické i tepelné rovnováze s okolím. To znamená, že teplota v bublině bude stejná jako teplota okolí a zároveň rozdíl tlaků musí být vykompenzován povrchovým napětím. Jakmile se bublina vytvoří, roste díky vypařování kapaliny na rozhraní kapaliny a páry.

3.1.1 Oblast izolovaných bublin

Růst bubliny probíhá prostřednictvím několika mechanismů. Rostoucí bublina může zachytit tenkou vrstvu kapaliny mezi rostoucí bublinou a ohřívaným povrchem. Vypařování této mikrovrstvy má za následek růst bubliny. Energie potřebná pro výpar této mikrovrstvy je dodána ohřívanou stěnou. Bublina může rovněž růst díky vypařování přehřáté kapalně vrstvy okolo bubliny. Dalším mechanismem pro růst bubliny je vypařování na třífázové kontaktní hranici, jakmile se utvoří suchý kousek místa na povrchu, díky částečnému vyschnutí mikrovrstvy. Rostoucí bublina může také narušit kapalinu přiléhající k bublině a přerušit mezní vrstvu přirozené konvekce, což má za následek přenos tepla mikrokonvekci. Při růstu bubliny, roste také vztlaková síla, která může iniciovat oddělení bubliny od povrchu. K přenosu tepla přes mikrovrstvu může nadále docházet, pokud nedojde k úplnému vysušení. Energie z přehřáté kapalně vrstvy může být dále předávána prostřednictvím okolí bubliny. Pokud se na povrchu vytvoří suché místo, kvůli částečnému vysušení mikrovrstvy během růstu bubliny, bude opět smočeno kapalinou, když se bublina oddělí od povrchu.

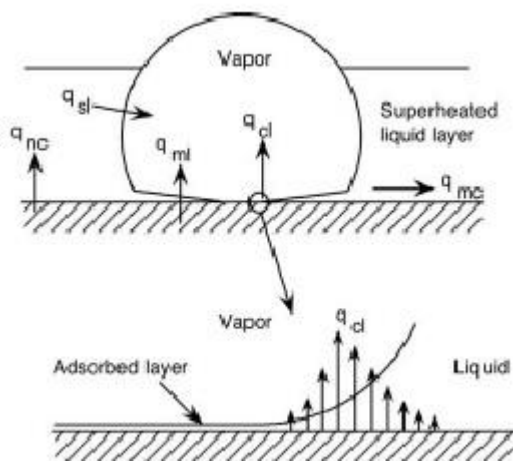
Mechanismů přenosu energie bublinou od ohřívaného povrchu je celá řada. Není proto divu, že bylo vytvořeno několik modelů, které mají popisovat právě danou problematiku. Tyto modely vznikly jako výsledek mnoha experimentálních prací. Mnoho dřívějších modelů bylo založeno na mechanismu míchání a mikrokonvekce. Tyto modely nezahrnovaly fázovou změnu, ale spoléhaly na analogii s nucenou konvekci. Například model navržený Forsterem a Greifem [35] předpokládá, že bubliny pracují jako pumpy, které odebírají teplou kapalinu z povrchu a nahrazují ji chladnější kapalinou z objemu.

Další model přechodného vedení předpokládá, že odtržená bublina od povrchu odstraňuje přehřátou vrstvu o velikosti dvojnásobné jak průměr bubliny a umožňuje tak chladnější kapalině přístup k ohřívanému povrchu, jako na obr. 4. Přitom se nepředpokládá přenos tepla z povrchu při růstu bubliny. Jako dominantním mechanismus přenosu tepla se předpokládá přechodné vedení. Pokud by byl tento model správný, očekáváme velké přenosy tepla v době po odtržení bubliny od povrchu. Přenos tepla při růstu a odtržení se předpokládá za zanedbatelný.

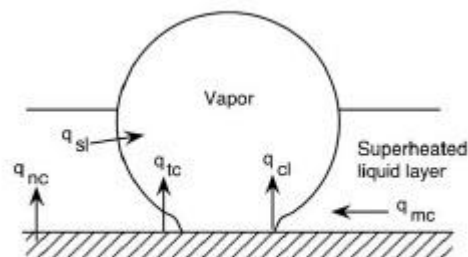


Obr. 4 Mechanismus přenosu tepla bublinou[7]

Další model, poprvé navržený pány Snyderem a Edwardsem, předpokládá přenos tepla i mikrovrstvou, která vznikne mezi bublinou ohřivaným povrchem. Při prováděných experimentech bylo pozorováno, že teplota povrchu strmě klesne při růstu bubliny, když se odpařuje mikrovrstva kapaliny, jak je znázorněno na obr. 5. Menší tepelný tok byl naměřen, když se ohřivaný povrch opět omočil chladnější kapalinou, viz obr. 6.



Obr. 5 Mechanismus přenosu tepla při růstu bubliny [7]



Obr. 6 Mechanismus přenosu tepla při oddělení bublinky od povrchu [7]

Model Stephana a Hammera z roku 1994 předpokládá, že dominantním mechanismem přenosu tepla bude přenos přes vypařování tenké kapalně výstelky na třífázové hranici. Přestože může být výstelka v okolí kontaktní hranice velice tenká, přenos tepla může být velmi vysoký. Absorbovaná vrstva je obvykle jenom několik molekul široká a nemůže být zcela vypařena kvůli molekulárním adhezním silám. Pokud by byl tento model správný očekávali bychom největší přenos tepla na třífázové kontaktní hranici.

Z nedávného experimentálního výzkumu přenosu tepla prostřednictvím izolované bubliny bylo zjištěno, že dominantním mechanismem jsou dočasné vedení a mikrokonvekce. Přenos tepla přes mikrovrstvu a kontaktní hranici se ukázal jako mechanismus minoritní. Žádný z výše uvedených modelů nepopisoval přesně zmíněnou problematiku.[7]

Mechanická rovnováha na rozhraní mezi bublinkou a okolní kapalinou je popsána Young-Laplaceovou rovnicí, kterou je možné psát ve tvaru:

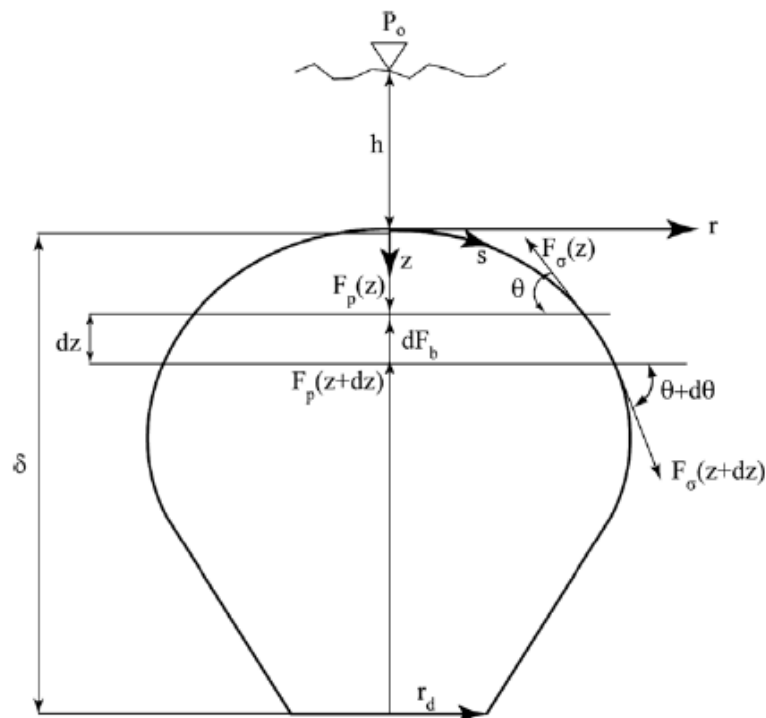
$$\Delta p = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \sigma_{1g} \quad (11)$$

R_1 a R_2 jsou poloměry zakřivení, respektive R_1 je poloměr popisující zakřivení šířky, R_2 je poloměr popisující zakřivení délky bublinky. Střed poloměrů R_1 a R_2 leží na stejné přímce, ale nikoliv na stejné pozici. Δp je změna tlaku mezi parní, p_g , a kapalnou fází p_l , které mohou být napsány ve tvaru:

$$p_g(z) = \frac{2\sigma_{1g}}{R_0} + P_0 + \rho_g g z + \rho_l g h \quad (12)$$

$$p_l(z) = P_0 + \rho_l g (h + z) \quad (13)$$

P_0 je okolní tlak a h je výška hladiny nad bublinkou. Tvar a síly působící na rostoucí bublinku jsou popsány na obr. 7. [25]



Obr. 7 Růst bublinky a síly na ni působící [25]

3.1.2 Oblast rozvinutého bublinkového varu

Při zvyšování tepelného toku a zároveň růstu teploty stěny T_z může dojít k situaci, kdy teplota stěny bude vyšší než teplota sytosti kapaliny T_{sat} . Vznikající bublinky se odtrhují od povrchu a přispívají k lepší cirkulaci chladiva, tudíž k velkým přenášeným hustotám tepelných toků. Dokud je teplota uvnitř jádra proudu chladiva T_c nižší než teplota sytosti, bublinky mohou kondenzovat a zaniknou. Po vyrovnání zmíněných teplot ($T_c = T_{sat}$) bublinky nemohou kondenzovat a nastává rozvinutý bublinkový var.

Pro výpočet přestupu tepla za podmínek rozvinutého bublinkového varu nelze použít Newtonův ochlazovací zákon (2). K výpočtu se používají různé relace a závislosti mezi hustotou tepelného toku a teplotou ohřivané stěny.

Výpočet přestupu tepla v aktivní zóně jaderného reaktoru je složitý a nelze jednoznačně určit dominantní režim. Reálná závislost mezi hustotou tepelného toku a teplotou stěny se pro zjednodušení linearizuje.[3][12]

3.2 Krize varu prvního druhu

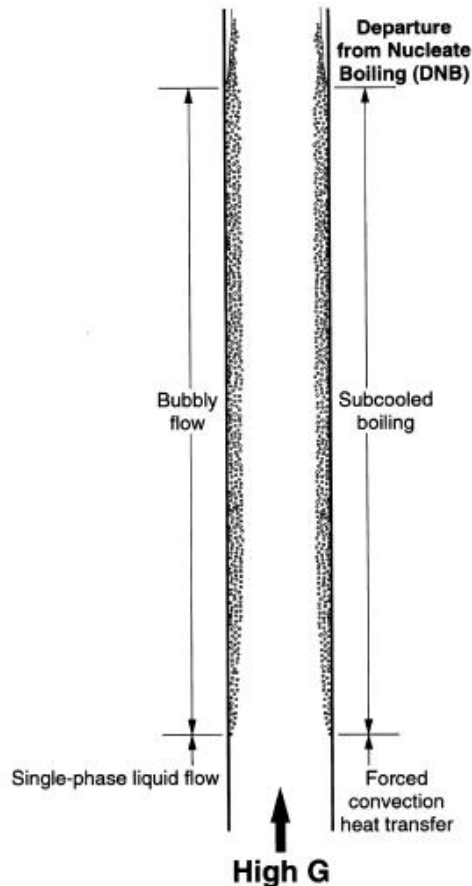
V praxi můžeme pozorovat dva možné režimy krize varu, závisející na hodnotě tepelného toku. Při nízkých hodnotách tepelného toku, nízkých hmotových rychlostech dochází ke krizi varu, když se kapalný film při prstencovém proudění začne zmenšovat natolik, že ohřivaný povrch nebude omočen chladícím médiem. Tento režim označujeme jako krizi varu druhého druhu, v angličtině „dry-out“. Druhý režim nastává při vyšších hodnotách tepelných toků, vysokých hmotových rychlostech a vysoké teplotě podchlazení, kdy ke krizi varu dochází přímo z rozvinutého bublinkového varu. Potom hovoříme o krizi varu prvního druhu, v angličtině „Departure from nucleate boiling“, znázorněné na obr. 8.

Krise varu prvního druhu je nebezpečná situace, kdy při varu dochází ke spojení bublinek do parního filmu. Zatímco při varu za nízkých tepelných toků fungovaly odtrhující se bublinky jako podpůrný prostředek pro cirkulaci chladiva, po jejich spojení a obklopení palivové tyče parní blánou je omezen přístup chladiva ze studenějšího jádra proudu. To znamená značné zhoršení přestupu tepla z povrchu. Ohříváný povrch nemůže být dostatečně chlazen a prudce zvyšuje svoji teplotu až do svého roztavení neboli „burn-out“.

Největší vliv na vznik takovýchto podmínek má hodnota kritické hustoty tepelného toku q_{kr} . Právě tato hodnota je jedním z nejdůležitějších návrhových parametrů tlakovodních reaktorů. Kritický tepelný tok je často interpretován jako maximální tepelný tok omočeného povrchu, jehož může tento povrch dosáhnout.

V minulosti i současnosti je snaha o vytvoření takového modelu, který by pokud možno co nejpřesněji popsal podmínky, které vedou ke vzniku krize varu prvního druhu. Z četných experimentů prováděných za různých podmínek vzniklo velké množství korelačních vztahů, které mají empirický charakter. Samotné použití těchto korelací je přesto velmi problematické, neboť hodnoty KTT se pro jednotlivé korelace značně liší. Rozdíly jsou způsobeny jednak vlastní složitou fyzikální podstatou krize varu a její nedostatečné znalosti v oblasti dvoufázového proudění, tak i v problematice vlastních experimentů. Jde zejména o různou definici vzniku krize přestupu tepla, přesnost měření při varu, použití různých materiálů pro stavbu experimentálního zařízení nebo různý způsob vyhodnocování výsledků.

Druhá část mojí práce se bude přímo zabývat přehledem prováděných experimentů, které měly za cíl stanovit hodnotu KTT.[10]

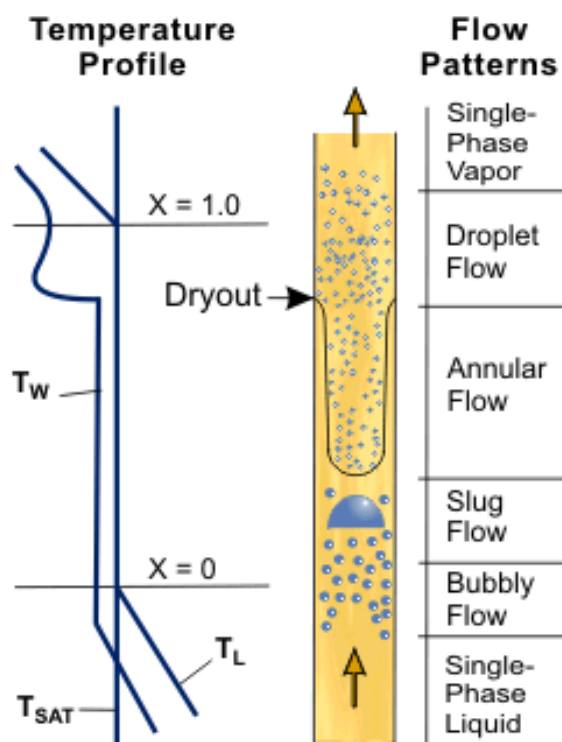


Obr. 8 Krize varu 1. druhu [11]

3.3 Krize varu druhého druhu

Krize varu druhého druhu nastává nejčastěji ve vyhřívaném kanále, ve kterém proudí chladivo při nízké hmotové rychlosti, jak je znázorněno na obr. 9. Nejdříve se voda ohřívá, aniž by docházelo ke změně fáze. Při dalším ohřevu vody nastane situace v blízkosti ohřívaného povrchu, kdy teplota vody bude vyšší než teplota sytosti. V tomto místě dojde k povrchovému varu. Jelikož teplota jádra proudu je nižší, než je teplota sytosti, vzniklé bublinky kondenzují. Až dosáhne teplota jádra hodnoty teploty sytosti, bublinky nekondenzují, ale zvětšují se a jsou rozloženy v kontinuální kapalně fázi.

Při stále intenzivnější tvorbě bublinek dochází ke vzniku prstencového proudění, kde hlavním mechanismem přenosu tepla z ohřívaného povrchu je vedení vodním filmem. Parní fáze v jádru se snaží strhávat kapalnou film a může docházet k vysušování ohřívaného povrchu. Po vytvoření suchých míst dochází k prudkému zvýšení teploty povrchu, nastává krize varu druhého druhu a hovoříme o tzv. „dry-out“. Tento jev je nebezpečný, neboť může dojít k plastickým deformacím a poškození palivového článku. [10]



Obr. 9 Krize varu 2. druhu [13]

3.4 Přechodový blánový var

Při řešení přechodových stavů je nutné počítat s nestabilní oblastí po dosažení kritické hustoty tepelného toku q_{kr} . Jedním z používaných korelačních vztahů je korelace McDonougha – Milicha – Kinga, která má tvar

$$q = q_{kr} - c(T_z - T_{z,kr}) \quad (14)$$

Konstanta c se mění v závislosti na tlaku vody v kanále, q_{kr} je kritický tepelný tok, T_z je teplota stěny a veličina $T_{z,kr}$ je teplota stěny v okamžiku dosažení krize varu. [3]

3.5 Stabilní blánový var

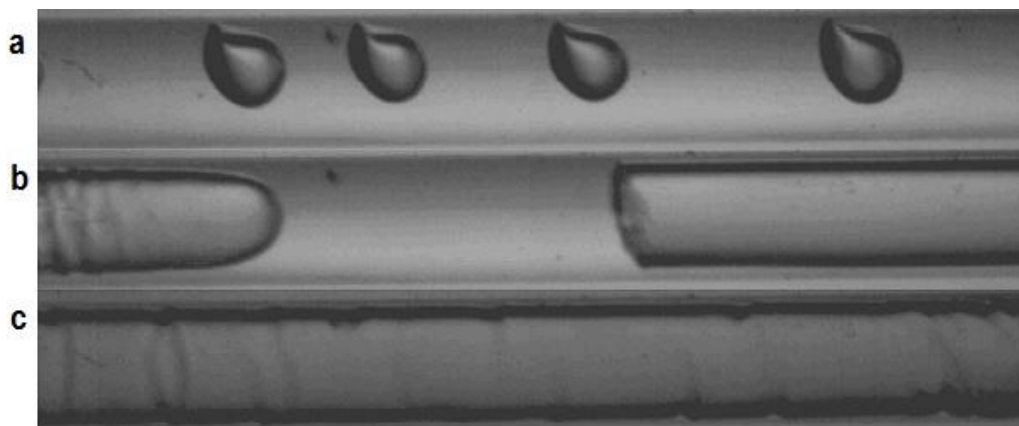
Pro tuto oblast můžeme opět zavést Newtonův zákon (2). Využíváme také experimentálních prací, na základě kterých byl získán součinitel přestupu tepla při stabilním blánovém varu.

3.6 Režimy dvoufázového proudění

Jak je patrné na obr. 9, dvoufázové proudění probíhá za třech různých režimů. Prvním z nich je bublinkové proudění, angl. Bubble flow, kdy se parní fáze přenáší přes oddělené bubliny v nepřetržitém toku kapalné fáze a délka bublin je menší než je průměr trubky.

Další režim nazývaný v angličtině „Slug flow“ je charakteristický protáhlými parními bublinami, které mají takřka stejně velký průměr jako je průměr trubky. Nos bubliny má charakteristický půlkulový tvar a parní fáze je od stěny trubky oddělena tenkou vrstvou fáze kapalné.

Posledním režimem je proudění prstencové, anglicky označováno jako „Annular flow“. Při tomto režimu proudí kapalná fáze na stěně trubky s kontinuálním prouděním parní fáze ve středu trubky. Všechny zmíněné režimy jsou patrné na obr. 10. [26]



Obr. 10 Režimy dvoufázového proudění – a) Bubble flow; b) Slug flow; c) Annual flow [26]

4. Experimenty kritického tepelného toku

Kritický tepelný tok je jedním z nejdůležitějších faktorů, který omezuje zvyšování zatížení lehkovodního jaderného reaktoru a tím zvýšení jeho účinnosti. Možná ještě důležitějším faktorem pro návrh jaderného reaktoru je KTT z hlediska bezpečnosti, na kterou se příkládá absolutně nejvyšší důraz. Výrobci těchto zařízení, odborná pracoviště po celém světě a nejvýznamnější technické univerzity se zabývají problematikou přestupu tepla z palivových tyčí do chladicího media. Tyto experimenty jsou prováděny zejména na velkých smyčkách s testovacími sekcemi s jednoduchou nebo složitou geometrií. Velmi často je geometrie totožná s geometrií palivového, respektive palivových, článků jaderného reaktoru z důvodu co nejpřesnější simulace aktivní zóny. Pro co nejrealističtější podmínky se musí zohlednit také nerovnoměrné rozložení výkonu v axiálním směru na svazku tyčí. Z velkého množství experimentů prováděných za ustálených podmínek byly odvozeny korelační vztahy popisující KTT.

KKT je bohužel často součástí havárie na jaderném zařízení. Důkazem může být havárie na japonské jaderné elektrárně Fukušima Daiči v březnu roku 2011. Zde došlo k vyřazení všech pohonů chladících zařízení a nastala havárie, která se v angličtině označuje jako LOCA – Loss of coolant accident neboli havárie při ztrátě chladiva, ze které plyne vznik krize varu v aktivní zóně a následné poničení palivových souborů s únikem radioaktivní vody do okolí. Další kritickou havárií může být LORA – Loss of Regulation accident neboli havárie při ztrátě kontroly, kdy reaktor neřízeně zvyšuje svůj výkon a opět může dojít ke vzniku krize varu a destrukci palivových souborů. Proto je nutné provádět simulace těchto nebezpečných situací pomocí experimentálních zařízení a držet návrhové parametry reaktoru na hodnotách, které dokážou zamezit vzniku tohoto jevu.

Neméně důležité je také experimentální ověřování termohydraulických charakteristik a mechanických vlastností u nově navržených palivových souborů, které se mají instalovat do připravovaných bloků jaderných elektráren.

Na celém světě bylo za posledních 60 let provedeno nespočet experimentů a všechny by se daly těžko shrnout do této práce. Některé z nich jsou veřejně nepřístupné a to zejména ty, které provádějí sami výrobci jaderných reaktorů, neboť se jedná o část jejich „Know-how“.

4.1 Rozdělení experimentů

Experimentální smyčky se mohou lišit v několika parametrech. Z hlediska teplotnosné látky rozlišujeme smyčky chlazené demineralizovanou vodou a smyčky chlazené různými freony. Demineralizovaná voda je pro potřeby experimentu nevýhodná, neboť pokud chceme simulovat podmínky aktivní zóny jaderného reaktoru, musíme dosáhnout velkých tlaků a teplot, což je finančně extrémně náročné. Na rozdíl od toho freony jsou schopny simulovat tyto podmínky za nižších tlaků a teplot při splnění podobnostních kritérií jako je poměr hustot nebo teplota varu. Pro představu freon R-134a a tlaku 1,13 – 1,67 MPa a teplotě 44 – 60°C se může srovnávat se 7 -10 MPa a 286 – 311°C vody.[9] Toto srovnání plyne z kritického bodu těchto dvou medií. Konkrétně kritická teplota vody je 374°C při tlaku 22,055 MPa a hustotě 322 kg/m³. [14] Oproti tomu kritická teplota media R-134a je 101,06°C při tlaku 4,059 MPa a hustotě 511,9 kg/ m³. [15]

Dle situování rozlišujeme horizontální, vertikální nebo nakloněné kanály, dle velikosti potom rozdělujeme kanály od mikrokanálů po kanály s průměrem několik desítek milimetrů a délkou několika metrů.

Experimenty lze rovněž provádět za nuceného proudění chladiva čerpadly a tudíž velkých hmotových rychlostech nebo za nulové nebo skoro nulové hmotové rychlosti, jakožto simulace havarijních situací, např. výpadku hlavních cirkulačních čerpadel.

Velice důležitým parametrem smyček je geometrie tyčí, na kterých byla krize přestupu tepla pozorována. V tomto ohledu rozlišujeme jednoduché geometrie v podobě kruhových trubek nebo mezikruhových kanálů nebo složité geometrie svazků tyčí, často s nerovnoměrným rozložením jak v axiálním tak radiálním směru.

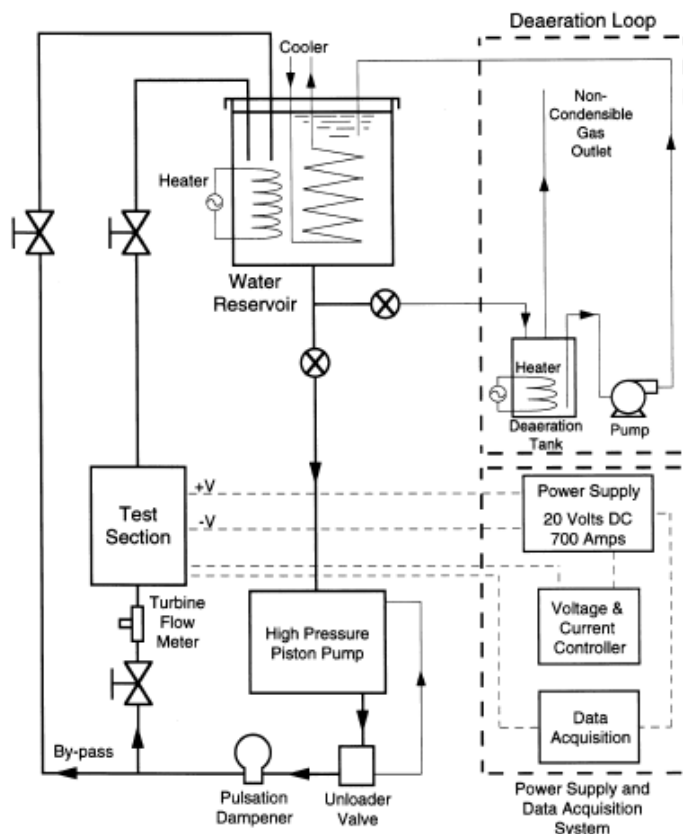
Experimenty se dále mohou rozlišovat podle smyček na neaktivní, aktivní a experimenty přímo v reaktoru. Neaktivní smyčky dovolují přímý přístup k zařízení a tím velkou schopnost určovat různé součinitele, např. místního odporu, tření, přestupu tepla apod. Zdroj tepla pro tyto smyčky je odporové teplo procházejícího elektrického proudu. Ve výzkumných nebo energetických reaktorech se provádějí experimenty na aktivních smyčkách, které jsou schopny modelovat míru vyhoření paliva, nerovnoměrné rozložení teplot v axiálním směru na svazku tyčí apod. Experimenty prováděné v přímo v reaktoru především při najíždění a vlastním provozu jsou určeny k ověření výpočtových modelů a jejich porovnání se skutečností.[8]

4.2 Experimenty za ustálených podmínek

4.2.1 Experiment Purdue University

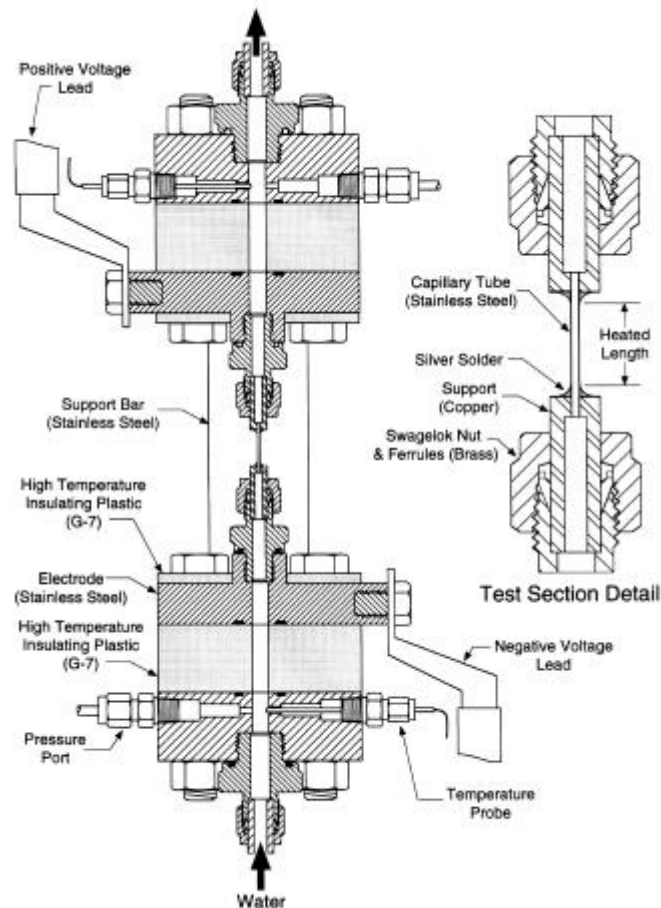
V roce 1997 byl na americké Purdue University prováděn experiment zabývající se problematikou ultra vysokého kritického tepelného toku. Takovýchto experimentů bylo do té doby publikováno relativně málo. Ultra vysokého kritického tepelného toku může být dosaženo při velkých hmotových rychlostech podchlazené vody v malém průměru trubky. Zapotřebí je takové zařízení experimentu, které odolá velkým hodnotám hmotových rychlostí, tlaků apod.

Smyčka na obr. 11 musela být projektována tak, aby vydržela tlak blížící se kritickému bodu. Voda z velkého zásobníku byla přiváděna do vysokotlakého pístového čerpadla, které zvýšilo tlak a zajistilo cirkulaci vody po celé smyčce. Uvnitř zásobníku byl ponořen chladicí svazek i ponorný ohřívač. Oboje mělo za úkol chladit nebo ohřívat vodu, čímž byla kontrolována teplota na vstupu do testovací sekce. Vysokotlaké čerpadlo dodávalo pomocí jeho tří pístů stabilně 15,1 litrů vody za minutu o maximálním tlaku 20,68 MPa. Ihned za čerpadlem byl umístěn ventil, který chránil proti přetížení. Za ventilem byl umístěn tlumič pulzací jak průtoku, tak tlaku. Část vody poté vedla do testovacího úseku a část se vrátila bypassem do zásobníku. Oddělená smyčka byla používána pro odvzdušnění vody před sérií testů. Průtok i tlak byl regulován bypassem. Turbínový průtokoměr byl umístěn před testovacím úsekem.



Obr. 11 Smyčka experimentu [11]

Testovací úsek na obr. 12 obsahoval identické bloky, které byly spojeny s testovacím úsekem pomocí šroubení převlečnou maticí. Mezi oběma bloky byla, kvůli správnému vymezení a také podpoře testovacího úseku umístěna nerezová podpurná tabule s drážkou pro připojení k dolnímu bloku. Každý z bloků, vyrobený z nerezové oceli, byl oddělen tlustou vrstvou sklolaminátu. Ten izoloval obě nerezové části jak tepelně, tak elektricky. Skrz blok byla vyvrtána díra o průměru 6,35 mm, sloužící pro umístění testovacího úseku. Jedna z nerezových částí obou bloků sloužila jako elektroda. Měděná podpora měřeného úseku byla našroubována pomocí závitů. Druhá z nerezových částí obou bloků obsahovala rovněž závit, ke kterému byla připojena část smyčky. Jeden z portů byl určen pro měření tlaku, druhý pro teplotní čidlo. K zajištění potřebného vysokého těsnění tlaku byly použity těsnicí kroužky mezi oběma nerezovými částmi a sklolaminátem. Všechny tyto tři části byly spolu spojeny čtyřmi ocelovými šrouby. Mezi hlavami šroubů a elektrodou bylo umístěno těsnění, které sloužilo jako elektrický izolátor. Na detailu testovacího úseku na obr. 12 můžeme vidět testovací kapiláru, připájenou stříbrem k měděným podporám na každém konci. Pájený spoj představoval těsnění mezi kapilárou a měděnou podporou, které dokázalo odolat velkým tlakům a teplotám stejně jako zajistilo nízkou elektrickou vodivost. Podpory poskytovaly spojení mezi testovací sekci a elektrodou pomocí mosazných svěrných kroužků.

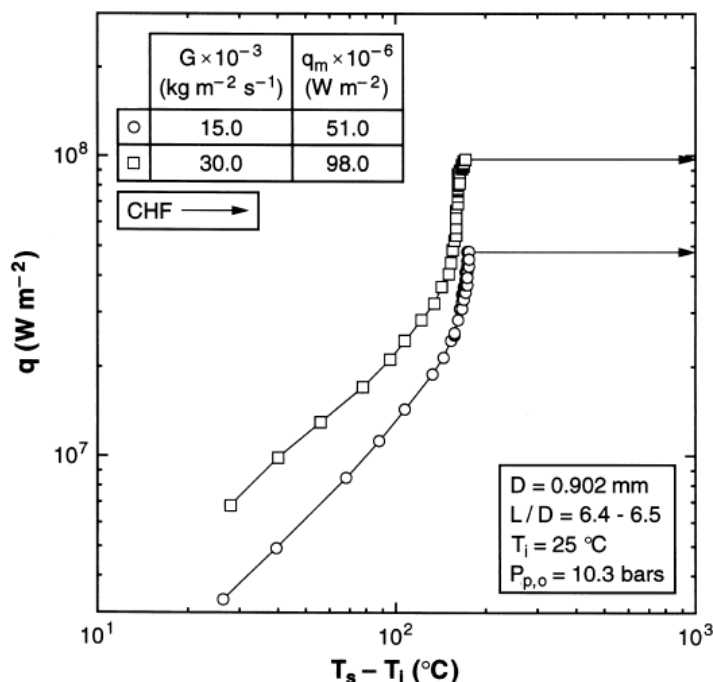


Obr. 12 Testovací úsek experimentu [11]

Elektrické kabely od zdroje byly připojeny ke dvěma nerezovým částem obou bloků. Teplo bylo generováno v měřicí sekci průchodem elektrického proudu do hodnoty 700 A a příslušného napětí 20 V. Elektrický odpor kapiláry byl mnohem větší než zbytku elektrického obvodu (kabely, nerezové elektrody, mosazné kroužky, měděná podpora, pájené spoje, atd.). KTT byl získáván pro různé kombinace průtoku, tlaku a teploty. Tyto parametry byly kontinuálně měřeny. Výkon dodaný do měřeného úseku byl spočítán z hodnot proudu a napětí procházející obvodem. Po každém zvýšení výkonu došlo k ustálení ostatních veličin, aby došlo k udržení odpovídajících testovacích podmínek. Při dosažení velmi vysokých kritických tepelných toků docházelo k fyzickému porušení kapiláry v blízkosti jejího konce. Nejistota měření výkonu byla menší než 3%. Nepřesnost výroby kapiláry od výrobce se pohybovala podle průměru mezi 6,3 – 4,2%. Proud a napětí byly zaznamenávány každé 2 s a tepelný tok byl stanovován v 30 sekundových intervalech. Celková nejistota měření se pohybovala mezi 6 – 8%.

Samotný experiment byl prováděn na tenké kapiláře s průměrem 0,406 mm a 0,902 mm a ohříváné délce okolo 5,6 mm. Experiment probíhal za velmi širokých hodnot jak hmotového toku vody, od 5000 do 134000 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$, tak tlaku, od 0,25 do 17,24 MPa. Dosažené kritické tepelné toky se pohybovaly v rozmezí 9,4 – 276 MWm^{-2} . Bylo dosaženo do té doby nejvyššího KTT, který byl zveřejněn, pro rovnoměrně ohřívanou tyč. Z provedeného experimentu bylo vytvořeno několik možných závislostí graficky zobrazených ve zprávě o experimentu. Na obr. 13 je možné dobře pozorovat režimy přestupu tepla. Do té doby, kdy křivka závislosti rozdílu teploty stěny a chladiva a tepelného toku stoupá v logaritmickém grafu pod úhlem 45°, jedná se o jednofázové

proudění. Jak se začne křivka výrazně lámat, dochází ke vzniku bublinkového varu a prudkému zvýšení tepelného toku až do dosažení KTT.



Obr. 13 Křivka varu pro různé hmotové toky vody [11]

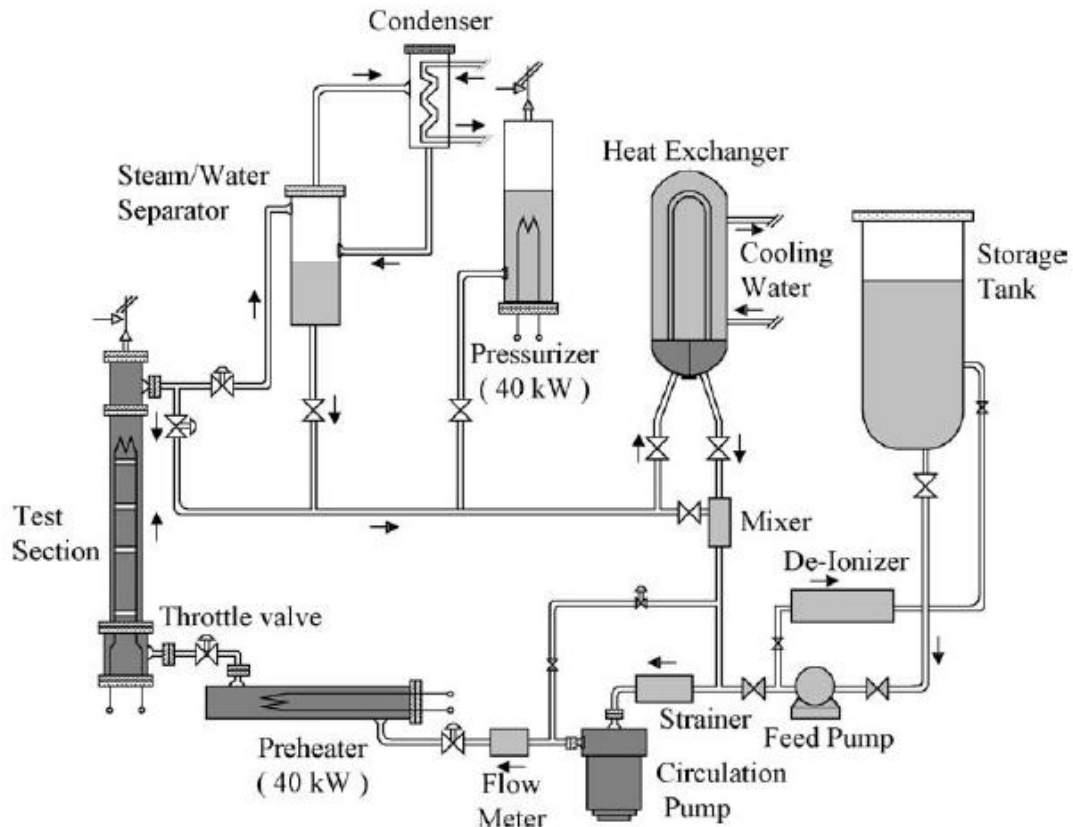
Z provedeného experimentu bylo pozorováno několik závislostí klíčových parametrů jako průměru ohřivané kapiláry, poměru délky a průměru, hmotového průtoku vody, podchlazení a tlaku. Všechny tyto závislosti jsou zobrazeny graficky ve zprávě o experimentu. Při zvyšování průměru dochází ke snižování hodnoty KTT. KTT se snižuje se zvyšujícím se poměrem délky a průměru. Se zvyšujícím se hmotovým tokem se zvyšuje i KTT. Vliv zvyšování podchlazení vykazoval lineární závislost zvyšování hodnot KTT. Hodnoty KTT se zvyšováním tlaku do 3 MPa zvyšují, od 3 do 15 MPa je průběh hodnot KTT téměř konstantní a po přiblížení kritického bodu se KTT snižuje.[11]

4.2.2 Experimenty KAERI

Na Korean Atomic Energy Research Institut (KAERI) bylo prováděno několik sad experimentů s různými experimentálními zařízeními a za různých podmínek experimentu.

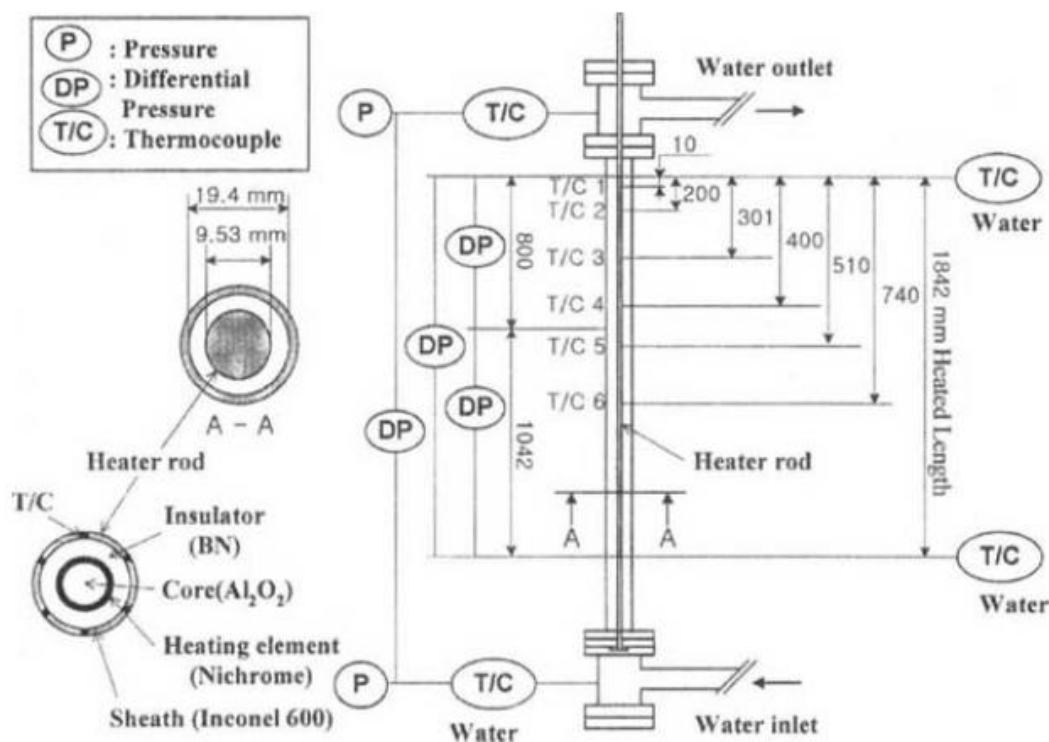
V roce 2002 byla prováděna experimentální studie KTT na nerovnoměrně ohřivaném vertikálním mezikruží při nízkých hodnotách hmotových rychlostí. Chování KTT při nízkých hmotových rychlostech je nejen důležité pro simulaci havarijních podmínek jaderného reaktoru, ale i pro budoucí generace využívající pasivních bezpečnostních systémů, založených na přirozené cirkulaci nebo odvodu tepla. Existuje celá řada experimentů, které se zabývaly chováním KTT při nízkých hmotových rychlostech za atmosférického tlaku, ovšem při rovnoměrném axiálním vývinu tepla. Do jaké míry se chování KTT mění s nerovnoměrným vývinem tepla je předmětem velmi početných experimentálních prací a existuje několik rozlišných přístupů k dané problematice. Výsledky získané z těchto experimentů byly porovnány s experimenty pracující s rovnoměrným ohřevem a byl ověřen taktéž korelační vztah používaný pro dané podmínky.

KAERI disponuje experimentální smyčkou na obr. 14. Smyčka je dimenzována na tlak 0,5 – 16 MPa, průtok 0,03 – 0,3 kg/s, maximální teplotu 347°C a výkon pro ohřev měřicího úseku 970 kW. Smyčka se skládá z hlavního cirkulačního čerpadla, předehříváče, testovací sekce, separátoru, kondenzátoru, kompenzátoru objemu a chladiče. Chladicím médiem je zde demineralizovaná voda. Průtok na vstupu testovací části je kontrolován pomocí upraveného hlavního cirkulačního čerpadla a kontrolních ventilů. Průtok testovací částí je měřen jedním ze tří vyústění. Oscilace proudu, které jsou obvyklé při nízkých hmotových rychlostech, jsou potlačeny škrtícím ventilem, umístěným před vstupem do testovací sekce. Předehříváč s výkonem 40 kW upravuje stupeň podchlazení vody vstupující do testovacího úseku. Konstantní hodnoty přetlaku na vstupu do testovací sekce jsou zajištěny pomocí kompenzátoru objemu s ponorným ohříváčem o výkonu 40 kW.



Obr. 14 Experimentální smyčka KAERI [17]

Obr. 15 představuje testovací úsek experimentu s geometrií topné tyče a umístěním měřicích senzorů. Průtokový kanál se skládá z vnější trubky o světlosti 19,4 mm a topné tyče s vnějším průměrem 9,53 mm, ohřívána délka tyče byla 1842 mm. Topná tyč byla vyhřívána nepřímou elektřinou. Plášť a topné těleso ohříváče byli vyrobeny z Inconelu 600 respektive z Nichromu. Uvnitř topného tělesa byl oxid hlinitý a mezi topným tělesem a pláštěm byl jako elektrický izolant nitrid boru. Pro měření teploty povrchu topné tyče a tudíž detekci vzniku krize tepelného toku, bylo umístěno 6 chrom-hliníkových plášťových termočlánků, jak je znázorněno na obr. 15. Úroveň tepelného toku ohřívané části je rozdělena na 10 částí, kvůli simulaci symetrického kosinového profilu tepelného toku. Topné těleso mělo na různých částech různý elektrický odpor, díky čemuž došlo k nerovnoměrné distribuci výkonu podél tělesa.

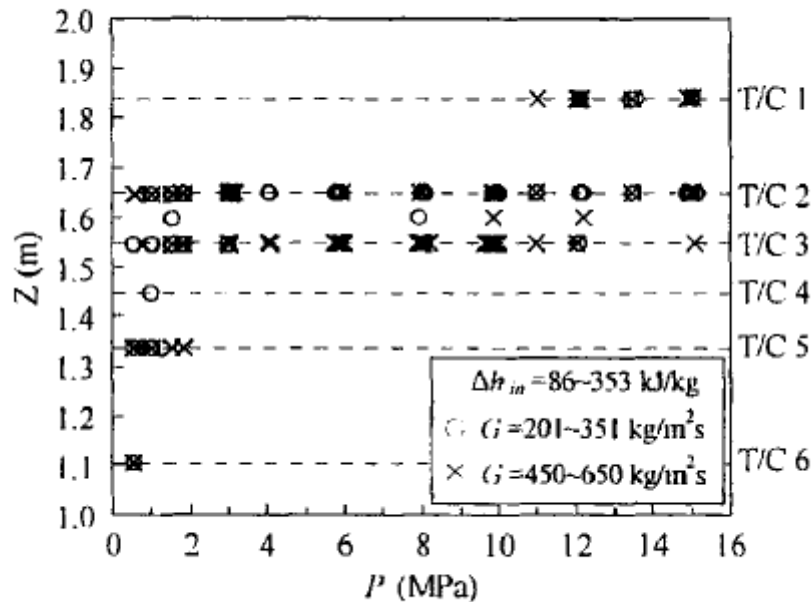


Obr. 15 Testovací úsek experimentu [16]

Experimenty byly prováděny následným způsobem. Nejprve se nastavily všechny potřebné parametry vody, tzn. průtok, podchlazení a tlak. Poté byla připojena topná tyč ke zdroji a následně se po malých krocích zvyšoval výkon, zatímco zbylé parametry byly udržovány na stálých hodnotách. Časová perioda mezi zvýšením výkonu musela být dostatečně dlouhá, aby byla smyčka udržena v ustálených podmínkách. Takto se pokračovalo do té doby, než došlo k prudkému zvýšení teploty povrchu topné tyče. Při dosažených podmínkách KTT byla kritická teplota povrchu zaznamenána blízko konci ohřivaného úseku. Podmínky KTT byly pro tento experiment určeny, když teplota povrchu topné tyče byla o 100 K vyšší než teplota syté vody. Při zaznamenání tohoto rozdílu, zdroj automaticky snížil svůj výkon, aby se předešlo mechanickému poškození topné tyče. Při těchto experimentech bylo získáno celkově 290 hodnot KTT při následujících podmínkách. Tlak v systému se pohyboval od 0,57 MPa do 15,01 MPa, hmotový tok byl v rozmezí $201 - 650 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a vstupní podchlazení vody $86 - 353 \text{ kJ/kg}$. Tlak na vstupu do testovací sekce je definován jako tlak systému. Vstupní podchlazení je definováno jako rozdíl entalpií syté vody a podchlazené vody na vstupu do ohřivaného úseku, jež je určena z teploty vody na vstupu do ohřivaného úseku a tlaku systému. Nejistota měření byla určena z kalibrace senzorů a z přesnosti měřícího vybavení. Maximální nejistoty měření tlaku a teploty se pohybovaly okolo 0,3% a 0,7 K. U výkonu dodávaného topné tyči se tady nejistota pohybovala okolo 1,8%. Tepelná ztráta byla při všech měřených tlacích menší než 2% příkonu.

Ke kritickému tepelnému toku pro rovnoměrný ohřev topné tyče dochází obvykle na horní části ohřivaného úseku. Je známo, že při nerovnoměrnému ohřevu k němu dochází mezi střední a horní částí ohřivaného úseku. Na obr. 16 je možné pozorovat místa, kde dochází ke kritickému tepelnému toku. Při některých pokusech experimentu termočlánky 2 a 3 pozorovali rapidní zvýšení teploty ve stejný čas. V tomto případě jsou data zaznamenána mezi těmito termočlánky. Nejvyšší četnost

KTT byla zaznamenána na termočláncích 2 a 3, které se nacházely u horního konce ohřivaného úseku. Avšak při tlacích menších než 2 MPa docházelo k zaznamenání podmínek KTT také na termočláncích 4, 5 a 6. Naopak při tlacích vyšších než 10 MPa bylo možné pozorovat KTT na termočlánci 1, který byl nejbližší hornímu konci ohřivaného úseku. Na termočlánci 5 docházelo k nejvyšší četnosti KTT při tlaku 0,57 MPa.



Obr. 16 Místa vzniku KTT na topné tyči [16]

Získaná data z provedeného experimentu byla porovnána s daty předchozích experimentů. 462 dat rovnoměrného a nerovnoměrného tepelného toku bylo porovnáno a byl zjišťován vliv axiálního rozložení tepelného toku na KTT. Podmínky proudění jako tlak, hmotová rychlost, vstupní podchlazení nemohly být přesně stejné u obou hodnot páru. Průměrné hodnoty absolutního rozdílu mezi dvěma hodnotami tlaku byly 0,039 MPa, hmotové rychlosti $2,5 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a 4,8 kJ/kg pro vstupní podchlazení. Z výsledků obou experimentů se došlo k závěru, že vliv axiálního rozložení tepelného toku na kritický tepelný tok je značný při tlaku menším než 2 MPa. Hodnoty kritického výkonu sobě odpovídají s chybou okolo 10% při tlaku vyšším než 2 MPa. Toto zjištění podporuje hypotézu celkového výkonu, která tvrdí, že celkový výkon, který můžeme dodat do vyhřívajícího úseku je pro oba případy stejný, s přihlédnutím na stejnou geometrii a podmínky experimentu.

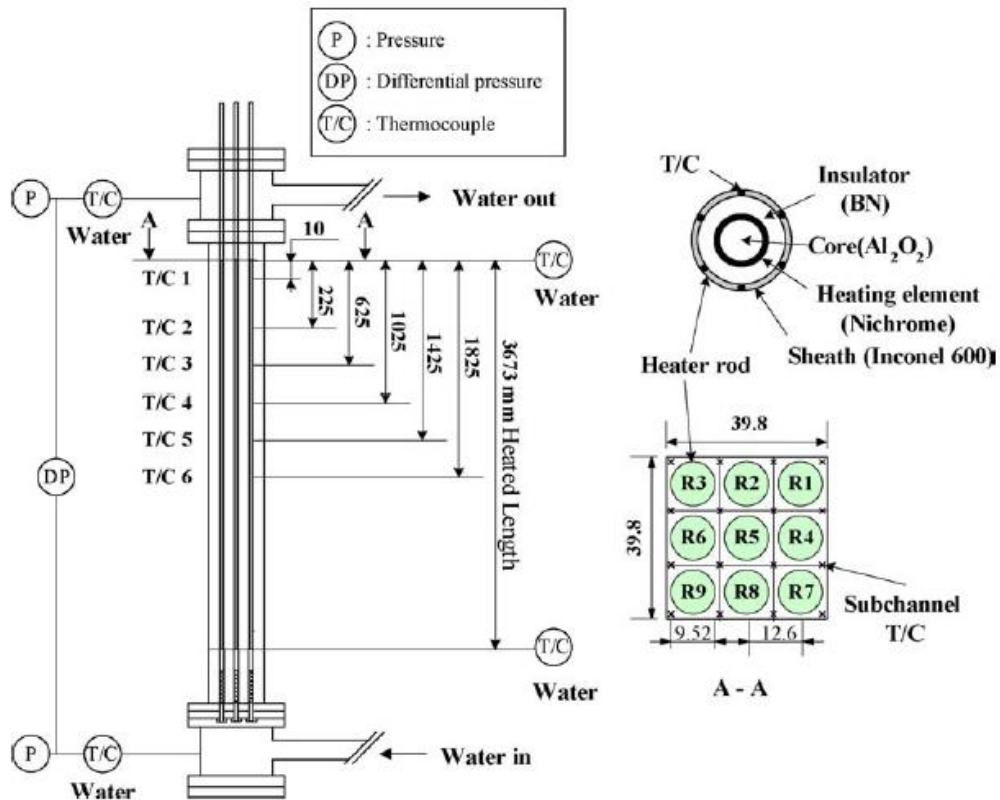
Získaná data z provedeného experimentu byla porovnána s příslušnými korelačními vztahy. Jednalo se o vztah Doerfera z roku 1994 a vztah Bowringa z roku 1997. Bowringova korelace předpovídá vznik KTT relativně přesněji než Doerferova, avšak výsledky těchto korelačních vztahů pro nerovnoměrný axiální tepelný tok vykazují značné chyby, v porovnání s výsledky pro rovnoměrný axiální tepelný tok. [16]

Další experiment na KAERI byl prováděn v roce 2004 na 3x3 svazku nerovnoměrně ohřívajících tyčí za podmínek nízkých hodnot hmotových rychlostí a široké škále tlaků. Jaderné reaktory obsahují kromě svazků palivových tyčí také povrchy, jež neprodukují teplo, jako jsou kontrolní a regulační tyče. Je známo, že tyto

povrchy ovlivňují entalpii chladiva a hodnoty kritického tepelného toku. Experimenty, které používají svazky tyčí, mohou blíže simulovat podmínky reaktoru než testovací sekce s jednoduchou geometrií tyče nebo mezikruží. Byla prováděna celá řada experimentů na svazku tyčí simulující podmínky jaderného reaktoru. Avšak pro nízké hodnoty hmotových rychlostí už je počet experimentů omezen a téměř neexistuje použitelný korelační vztah pro tyto podmínky.

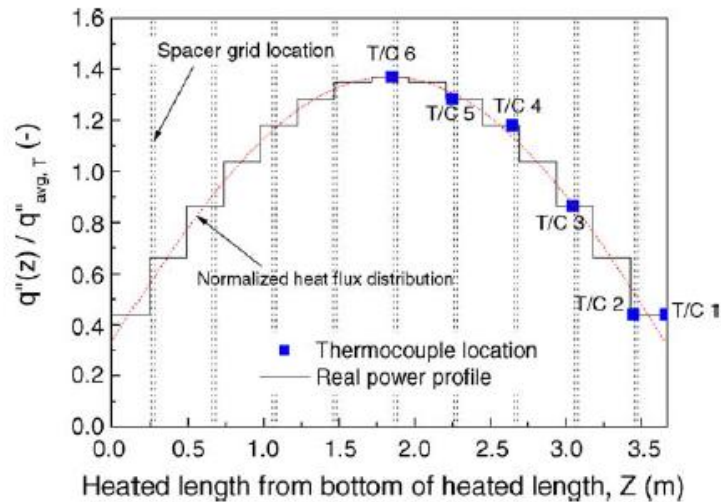
Experiment byl prováděn na smyčce KAERI, která je na obr. 14. Tato smyčka je totožná se smyčkou používanou v předchozím experimentu z roku 2002.

Na obr. 17 je možné pozorovat testovací sekci experimentální smyčky. Základem je tlaková nádoba o rozměrech 39,8 mm na 39,8 mm, která obsahuje 9 topných tyčí, každá o vyhřívané délce 3673 mm. Topná tyč má průměr 9,52 mm a rozteč tyčí je 12,6 mm. Topné tyče jsou nepřímě ohřívány střídavým proudem. Plášť a topné těleso topné tyče jsou vyrobeny z Inkonelu 600 a Nichromu. Pro podporu topných tyčí je v testovací sekci umístěno 11 distančních mřížek. Jejich přítomnost by neměla mít vliv na KTT, protože neobsahují míchací lopatky a termočlánky pro měření teploty stěny jsou umístěny před nimi. Pro měření teploty povrchu topné tyče a zaznamenání vzniku KTT je umístěno čtyři nebo šest plášťových termočlánků o průměru 0,5 mm na povrchu topných tyčí. Polohy jednotlivých termočlánků jsou okótovány na obr. 17. Šestnáct termočlánků stejného typu je umístěno na vstupu a výstupu ohřívajícího úseku.



Obr. 17 Testovací sekce experimentální smyčky [17]

Na obr. 18 je dobře patrné rozdělení ohřívajícího úseku na 15 částí za účelem simulace nerovnoměrného tepelného toku v axiálním směru. V radiálním směru je tepelný tok rovnoměrný, to znamená, že každá tyč je ohřívána stejným výkonem.



Obr. 18 Nerovnoměrný axiální tepelný tok [17]

Tlak systému by měl být definován jako tlak na konci testovací sekce, protože ke kritickému tepelnému toku dochází právě v horní části testovací sekce. Hodnoty průtokových rychlostí v tomto experimentu byly tak malé, že tlaková ztráta přes testovací sekci je zanedbatelná v porovnání s tlakem systému. Z toho plyne, že tlak měřený před vstupem do testovacího úseku byl použit jako testovací parametr. Pro analýzu KTT je použito průměrných hodnot hmotových rychlostí, neboť je velmi obtížné změřit přesné lokální podmínky. Maximální nejistoty měření byly dosaženy $\pm 3\%$, $\pm 1,5\%$, $\pm 0,7$ K pro hodnoty tlaku, hmotové rychlosti a teploty. Pro měření dodávaného výkonu byla zajištěna nepřesnost menší než $\pm 1,8\%$. Tepelná ztráta ohřívané části byla odhadnuta z předchozích testů menší než 2%.

Experiment probíhal stejně jako předešlý experiment. Celkem bylo dosaženo 299 hodnot KTT.

Nejvíce prvních hodnot kritických tepelných toků bylo zaznamenáno na tyčích R1, R2, R7 a R5 a okolo 60% jich bylo zaznamenáno na termočlátku č. 3, dalších 30% pak na termočlátku č. 2, které jsou vidět na obr. 17. Získané hodnoty dokazují, že KTT je více pravděpodobný v oblastech rohů, než ve střední části svazku. Důvodem je to, že v rohových oblastech je nižší rychlost proudění a je zde neohřívána stěna, což se nazývá efekt studené stěny. Na studené stěně se tvoří tenký kapalný film stejně jako na ohřívané tyči, s tím rozdílem, že na ohřívané dochází k procesu vypařování a vzniku KTT. Většina z hodnot KTT byla dosažena při prstencovém proudění, díky vyschnutí kapalného filmu na povrchu topné tyče.

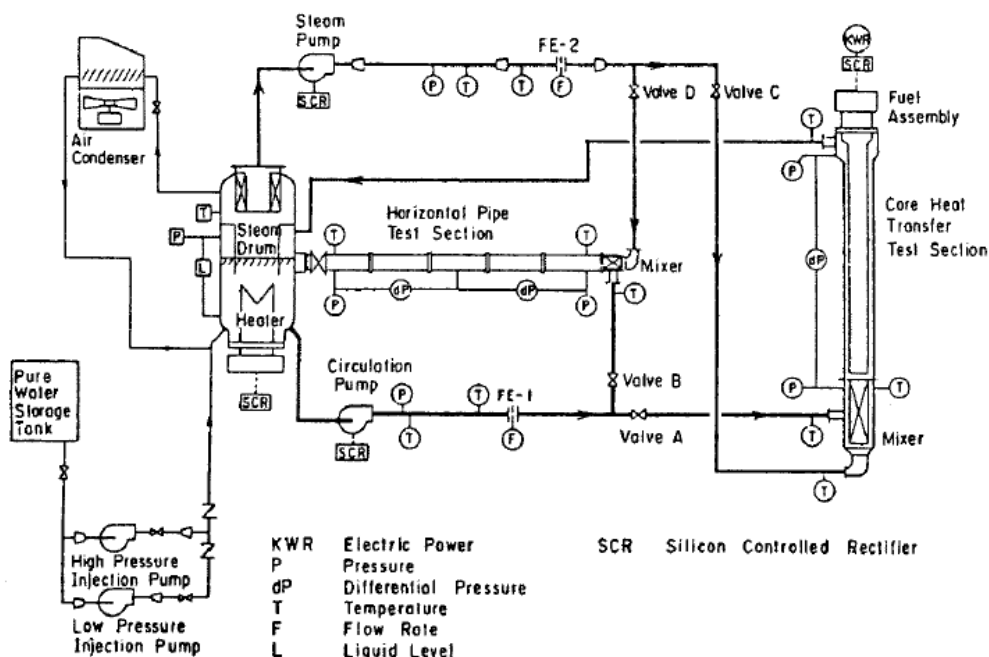
Ze získaných hodnot byl vytvořen korelační vztah, který byl poté porovnáván s dalšími třemi korelačními vztahy – tabulkou kritických tepelných toků sestavenou Groeneveldem v roce 1996, korelací EPRI z roku 1983 a korelačním vztahem Macbetha z roku 1963. Přestože všechny tři korelace dokázaly předpovědět KTT relativně spolehlivě, už ne tak spolehlivě předpověděly KTT při nízkém hmotovém toku. [17]

4.2.3 Experiment JAERI

Na japonském Japan Atomic Energy Research Institute byl prováděn v roce 1988 experiment na svazku 5x5 rovnoměrně ohříváných tyčí za vysokého tlaku a nízkých hodnotách hmotových toků při smíšených podmínkách. Tyto podmínky měly za úkol simulovat podmínky havárie jaderného reaktoru LOCA. Při těchto podmínkách

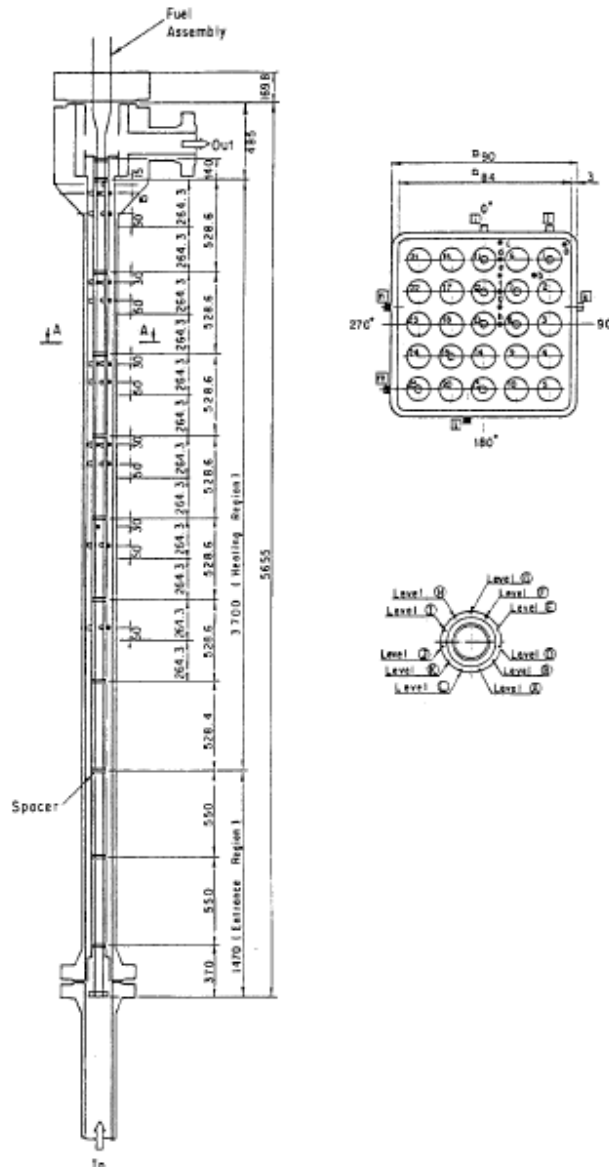
byla pozorována krize varu druhého druhu neboli „dry-out“. Získané hodnoty KTT z experimentu byly porovnány s několika korelačními vztahy.

Experiment byl prováděn na experimentální smyčce JAERI na obr. 19. Voda v parním bubnu je ohřívána, aby dodávala vodu a páru za vysokého tlaku a teploty. Tyto složky jsou posílány do směšovače, který je umístěn před vstupem do testovací sekce za parním a cirkulačním čerpadlem. Průtok páry a vody je směšovačem upraven tak, aby do testovací sekce vstupoval jejich přesný poměr.



Obr. 19 Experimentální smyčka JAERI [18]

Na obr. 20 je možné vidět testovací sekci experimentu. 25 plášťových topných tyčí o vnějším průměru $12,27 \pm 0,05$ mm bylo sestaveno do čtvercového kanálu s ohřívanou délkou 3700 ± 37 mm. Svazek 5×5 topných tyčí o rozteči $16,16 \pm 0,05$ mm je podporován horním a spodním tenkým plechem a devíti mřížkami. Jak axiální tak radiální směr ohřevu topné tyče je rovnoměrný. Plášť a topné těleso jsou vyrobeny z Inkonelu 600 a Nichromu 5. Elektrický izolátor uvnitř topného tělesa je slinutý nitrid boru a mezi topným tělesem a pláštěm je umístěn nitrid boru. Devadesát devět plášťových chrom-hliníkových termočlánků s vnějším průměrem 0,5 mm je připojeno k plášti devíti topných tyčí pro měření jejich teploty povrchu. Čtyřicet plášťových termočlánků s vnějším průměrem 0,65 mm je umístěno těsně před mřížkami za účelem měření teploty parovodní směsi. Deset plášťových termočlánků s vnějším průměrem 1,6 mm je umístěno na vnitřním povrchu kanálu pro měření jeho teploty. Dvacet čtyři vodivostních sond je umístěno na vnitřním povrchu testovacího kanálu pro měření poměru vody a páry v testovací sekci. Průtok páry a vody je měřen před vstupem do směšovače. Tepelný tok na povrchu topné tyče je vypočítán z elektrického výkonu dodaného do zařízení. Nejistota měření je pro tlak, průtok vody a páry 0,6%, pro tepelný tok 1,4% a pro teplotu topné tyče 3 K.



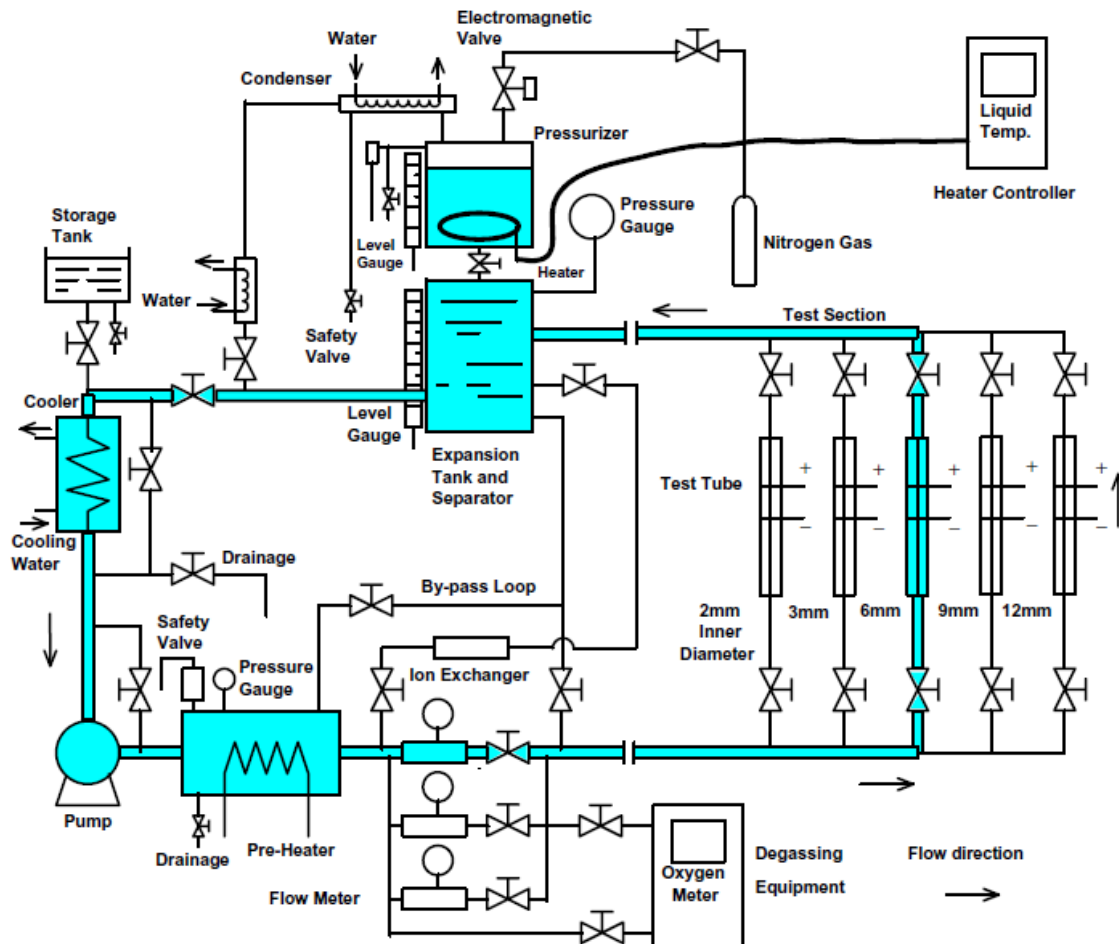
Obr. 20 Testovací úsek experimentální smyčky [18]

Všechna provedená měření experimentu byla provedena za smíšených podmínek, tzn. do testovacího úseku vstupovala dvoufázová parovodní směs, pro tlaky od 3 do 12 MPa, hmotového toku od 20 do 410 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a vstupní suchost 0,4 až 0,9. Tepelný tok se zvyšoval postupně po krocích a ostatní podmínky byly udržovány na stejných hodnotách. Hodnoty tepelného toku byly zaznamenány po každém jeho zvýšení, jakmile bylo dosaženo ustálených hodnot ostatních podmínek. Maximální teplota povrchu topné tyče se pohybovala od 350 do 650 °C. Hodnota KTT pro každou topnou tyč byla stanovena, když termočlánek zaznamenal prudké zvýšení teploty povrchu topné tyče o více než 20 °C. Takto bylo stanoveno místo vzniku KTT s přesností ± 17 až ± 26 cm. Celkově bylo provedeno 87 měření a získané hodnoty z těchto měření byly porovnány s několika korelačními vztahy, které se běžně používaly pro stanovení KTT. Jednalo se o korelace Biasiho, Bowringa a Katta. Po srovnání hodnot korelací a provedeního experimentu vyplynulo, že Biasiho korelace předpovídá hodnoty KTT, které převyšují skutečné hodnoty. Naopak Bowringova korelace předpovídá hodnoty KTT, které jsou nižší, než skutečné hodnoty experimentu. Jedinou spolehlivou korelací se ukázala být korelace Katta. [18]

4.2.4 Experiment NIFS

V roce 2012 byl prováděn experiment na horizontálně orientované trubce mající za cíl studovat chování přenosu tepla při turbulentním proudění, při varu a při kritickém tepelném toku pro návrh části experimentálního zařízení jaderné fúze v angličtině Large Helical Device, které se připravovalo na National Institute for Fusion Science neboli NIFS.

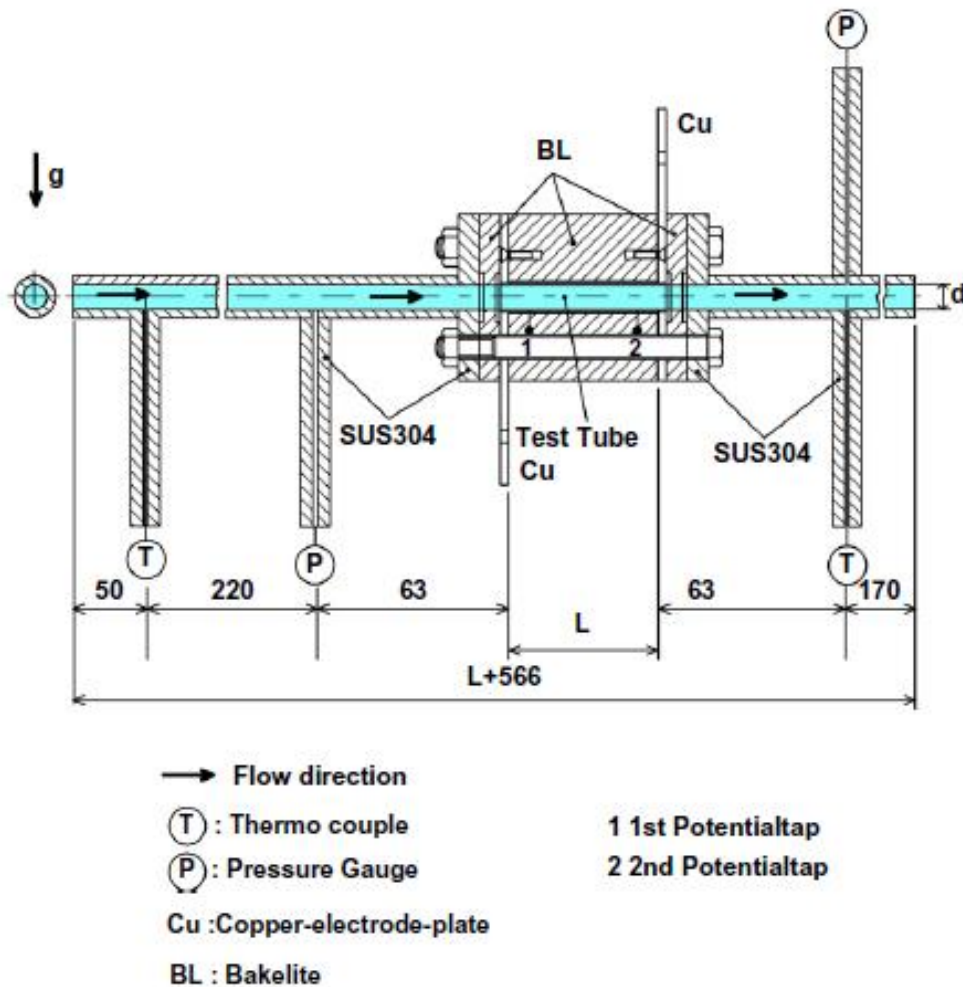
Experimentální smyčka, na obr. 21, byla vyrobena z nerezové oceli a schopná pracovat do tlaku 2MPa. Měla celkem pět testovacích úseků, jejichž průměry byly 2, 3, 6, 9 a 12 mm. Pro tento experiment byla použita sekce o průměru 6 mm. Pracovním médiem byla destilovaná a demineralizovaná voda. Pro udržování konstantní teploty vody byl umístěn ve smyčce přehříváč a chladič. Rychlost proudění byla měřena pomocí Coriolisova průtokoměru a ovládána pomocí regulace průtoku frekvenčním měničem. Tlak vody byl dosažen pomocí sytých par v kompenzátoru objemu. Tlak na vstupu do testovací sekce byl ovládán s přesností $\pm 1\text{kPa}$ pomocí regulátoru ohřevu a kompenzátoru objemu.



Obr. 21 Experimentální smyčka [19]

Testovací sekce o průměru 6 mm je znázorněna na obr. 22. Pro experimenty KTT byly použity trubičky z nerezové oceli s hrubou drsností povrchu. Tloušťka stěny trubičky byla 0,5 mm. Délka měřeného úseku na nerezové trubičce byla 48,4 mm. Na obou koncích testovací trubičky byly připájeny postříbřené 5 mm tlusté měděné elektrody, které přenášely proud do trubičky. Oba konce testovací trubičky byly elektricky izolovány od zbytku smyčky speciálním plastem o tloušťce 14 mm. Testovací trubička byla ohřívána přímým zdrojem proudu přes dvě měděné elektrody. Při

dosažení KTT se prudce zvýšila teplota trubičky a při zvýšení teploty povrchu o několik desítek kelvinů oproti teplotě povrchu při dosažení KTT došlo k odpojení zdroje, aby nedošlo k mechanickému poškození trubičky. Průměrná teplota testovací trubičky byla měřena pomocí odporových termometrů. Vstupní a výstupní teploty vody do a z testovací sekce byly měřeny pomocí plášťových termočlánků typu K s vnějším průměrem 1 mm. Byly umístěny 283 mm před testovací sekci a 63 mm za testovací sekci. Vstupní a výstupní tlaky byly měřeny tenzometrickými snímači umístěnými 63 mm před testovací sekci. Chyby měření byly stanoveny na ± 1 K pro vnitřní povrch testovací trubičky a pro tepelný tok $\pm 2\%$. Pro rychlost proudění, podchlazení a tlaky byla stanovena chyba $\pm 2\%$, ± 1 K a $\pm 2\%$.



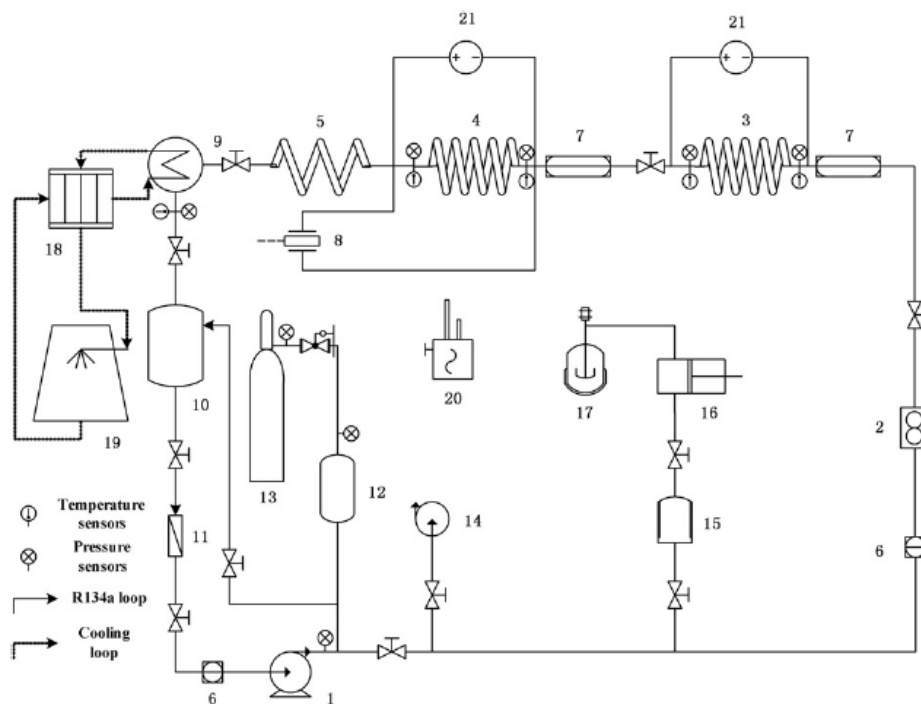
Obr. 22 Testovací úsek s průměrem 6 mm [19]

Experiment probíhal na testovací sekci o průměru 6 mm, ohřivané délce 59,4 mm s tloušťkou stěny 0,5 mm. Průtokové rychlosti se pohybovaly mezi 4 – 13,3 m/s a výstupní tlak okolo 800 kPa. Vstupní a výstupní podchlazení se pohybovalo mezi hodnotami 60,4 – 154,2 K. Hodnoty KTT byly stanoveny pro podmínky na vstupu do testovacího úseku. Celkem bylo dosaženo 69 hodnot KTT, které se vměstnaly do rozmezí $\pm 15\%$ pro dané podmínky podchlazení a rychlostí proudění. [19]

4.2.5 Experiment Shandong University

V roce 2010 byla prováděna celá sada experimentů na čínské Shandong University. Experimenty byly prováděny na spirálovitě vinuté trubce s použitím freonu jako chladicího média. Mnoho předchozích prací se zabývalo chováním KTT na rovných tyčích, popřípadě svazku tyčí. Mnoho průmyslových zařízení pro přenos tepla využívá výhod spirálovitého vinutí trubky jako je vysoká výměnná plocha při zabírání stejného prostoru jako trubka rovná. V letadlech nebo ponorkách je nezbytné, aby byly trubky orientovány horizontálně. Experimenty s takovými parametry byly prováděny velmi zřídka. Freony, jako pracovní látky ve smyčkách, byly často užívány jako náhrada vody s ohledem na nižší nároky na hodnoty tlaků a teplot pro dosažení KTT. Montrealský protokol zakázal používání těchto látek, kvůli jejich ničivému vlivu na ozonovou vrstvu. Pro tento experiment byl proto použit plyn R134a, který je šetrný k životnímu prostředí.

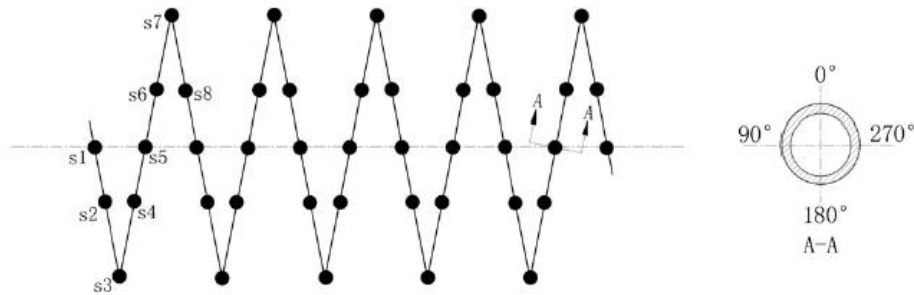
Na obr. 23 je vidět experimentální smyčka, která se skládá z pracovní smyčky, obsahující chladivo R134a, a chladicí smyčky obsahující roztok chloridu vápenatého a vody. Smyčka obsahuje komponenty jako čerpadlo, Coriolisův průtokoměr, předehříváč, přesné zdroje stejnosměrného proudu, kondenzátor, chladicí jednotku, zásobník dusíku a systém pro získávání dat. Smyčka je navržena na tlak 1,6 MPa a teplotu 200°C, zdroj předehříváče 24 V, 200 A a zdroj testovacího úseku 60 V a 500 A. Chladicí jednotka má maximální výkon 50 kW.



Obr. 23 Experimentální smyčka [20]

Celkem bylo vyrobeno 14 testovacích sekcí, každá z nich z nerezové oceli. Testovací sekce byla vytápěna vysoko-proudým zdrojem za účelem konstantního tepelného toku. Teplota chladiva na vstupu a výstupu byla měřena pomocí plášťových termočlánků typu T s průměrem 0,3 mm. Přesné senzory tlaku byly umístěny na stejných pozicích jako termočlánky. Teplota na vnější stěně byla měřena termočlánky typu T s průměrem 0,2 mm podél celé testovací trubky. Umístění termočlánků je možné pozorovat na obr. 24. Vstup a výstup testovací sekce je umístěn 5 mm od měděných

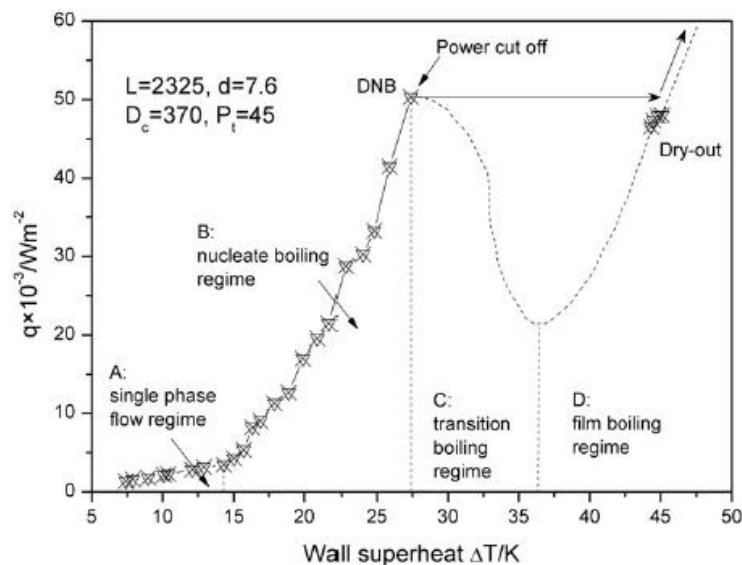
elektrod spojených se zdrojem stejnosměrného proudu. Testovací trubky byly zabaleny do speciálního polyetylenu poskytující tepelnou izolaci.



Obr. 24 Rozmístění termočlánků na trubce [20]

Při experimentu bylo provedeno celkem 98 měření při rozsahu tlaků 0,3 – 1,1 MPa, hmotového toku $60 - 480 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$, suchosti páry -0,32 – 0,36 a kritických tepelných toků od 6 kWm^{-2} do 90 kWm^{-2} . Před každým měřením byla zajištěna tepelná rovnováha. Z výsledků je patrné, že průměrná tepelná ztráta nebyla větší než 5%. Chladicí médium bylo z nádrže čerpáno do smyčky pomocí čerpadla. Hmotový tok byl regulován právě pomocí čerpadla nebo ventilů. Tlak byl regulován pomocí nastavení hmotového toku chladicí smyčky, zdroje přehříváče a zásobníků s dusíkem. Když byly hodnoty tlaku a hmotového toku nastaveny na požadované hodnoty, vstupní teplota byla regulována zvyšování nebo snižování výkonu přehříváče. Výkon zdroje do testovací sekce byl zvyšován prudce na začátku experimentu, následně pomalu po krocích okolo 50 Wm^{-2} do vzniku KTT. KTT byl zaznamenán, když jeden z termočlánků zaznamenal limitní hodnotu teploty stěny. Software poté, během 0,1 s, vyslal signál pro vypnutí zdroje do testovací sekce. Maximální nejistota měření délky testovací sekce byla $\pm 0,117\%$ a průměru $\pm 0,53\%$. Teplota, tlak, hmotový tok, napětí a proud byli měřeny postupně s nejistotami $\pm 0,49\%$, $\pm 1,3\%$, $\pm 2,1\%$, $\pm 0,82\%$ a $\pm 2,2\%$. Maximální nejistota měření hodnoty KTT byla okolo $\pm 2,4\%$.

Ze získaných dat byla vytvořena křivka varu, na obr. 25. Křivka vystihuje známý průběh závislosti tepelného toku na přehřátí stěny, kdy lze celý proces rozdělit na čtyři režimy. Po dosažení KTT byl zdroj odpojen, tudíž nejsou k dispozici data v přechodném blánovém režimu.



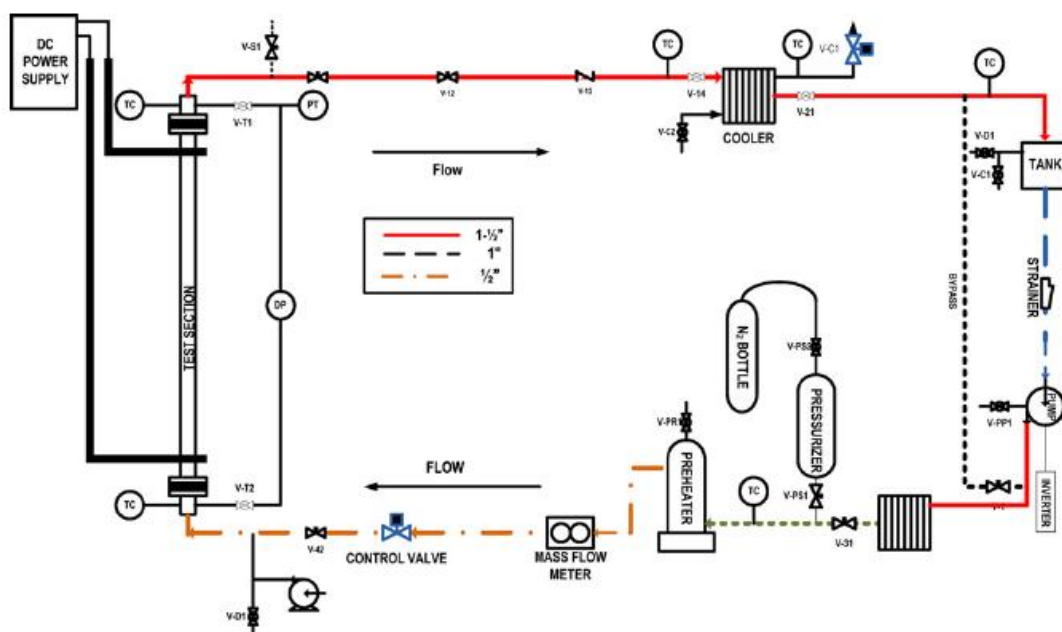
Obr. 25 Závislost tepelného toku na přehřátí stěny [20]

Získaná data kritických tepelných toků byla porovnána s Browningovou a Shahovou korelací a došlo se k závěru, že hodnoty obdržené ze zmíněných korelačních vztahů jsou značně rozptýlené od hodnot experimentálních. Obě korelace mohou poskytnout přesné určení hodnot KTT pro rovné trubky s chladivem vodou nebo R12, ale neposkytují uspokojivé srovnání pro chladivo R134a za podmínek experimentu. Proto byl vytvořen pro dané podmínky experimentu nový korelační vztah, který určoval hodnotu KTT s přesností $\pm 20\%$. [20]

4.2.6 Experiment SNU

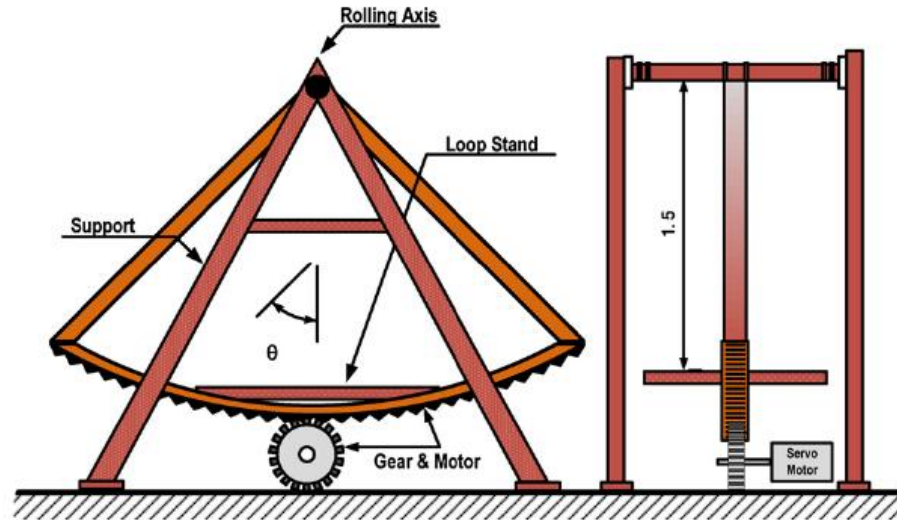
V roce 2011 byl prováděn na jihokorejské Seoul National University experiment zabývající se kritickým tepelným tokem při kolébatém pohybu. Tyto zvláštní podmínky nastávají zejména při provozu vojenského jaderného reaktoru na oceánském plavidle. Právě KTT je jev, který je ovlivněn pohybem – jednak kolébatým ale i zvedavým. Několik experimentů bylo prováděno při zvedavém pohybu, kde dochází pouze k přídavnému zrychlení ke zrychlení gravitačnímu. U kolébatého pohybu je situace složitější, neboť zde dochází ještě k přídavnému odstředivému a tangenciálnímu zrychlení. Podobný experiment nebyl do této doby prováděn.

Experimentální smyčka na obr. 26 se skládala z testovací sekce, čerpadla, průtokoměru, předehříváče pro regulaci vstupní teploty do testovací sekce, respektive vstupního podchlazení, kompenzátoru objemu k regulaci tlaku ve smyčce, chladiče pro kondenzaci vypařeného chladiva a chladicí systém s vodou. Chladicím médiem bylo chladivo R-134a. Pro přesně regulovaný tok chladiva do testovací sekce byl použit regulační ventil. Smyčka byla navržena pro tlak 4 MPa a teplotu 200°C. Tlaky a teploty byly ve smyčce měřeny na různých místech, na obr. 24 označeny jako PC – tlakoměr a TC – termočlánek.



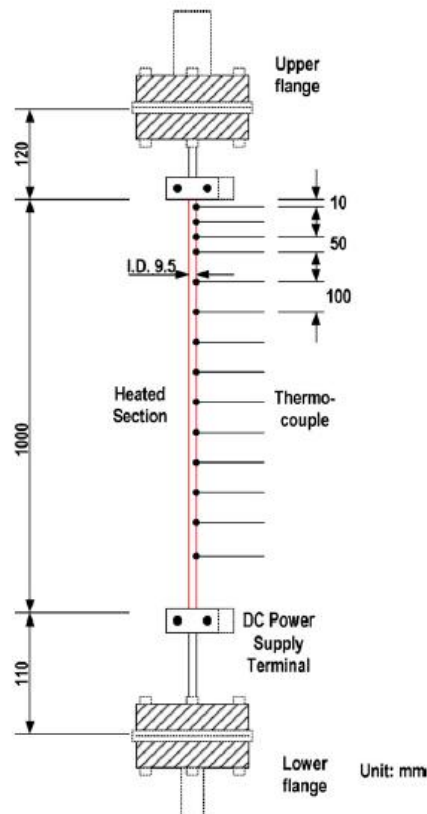
Obr. 26 Experimentální smyčka [21]

Pohyblivý aparát na obr. 27 se skládal ze základny pro smyčku, nosné konstrukce, převodovky a motoru k řízení kolébání. Osa pohybu byla vzdálena 1,5 m od základny pro smyčku o rozměrech 1x1 m. Amplituda a perioda pohybu mohla být řízena pomocí nastavení rychlosti elektromotoru a pomocí převodovky.



Obr. 27 Pohyblivý aparát [21]

Testovací sekce na obr. 28 byla vyrobena z nerezové oceli. Jde o přímo vyhřívanou trubku stejnosměrným proudem s maximálními hodnotami napětí 40 V a proudu 1200 A. Ohřívaná délka trubky byla 1 m, vnitřní průměr 9,5 mm a tloušťka stěny 1,65 mm. Tato geometrie odpovídá hydraulickému průměru vojenského reaktoru. Vstupní a výstupní teplota chladiva do testovací sekce byla měřena plášťovými termočlánky typu T. Teplota venkovní stěny trubky byla měřena na 14 místech podél trubky, podle obr. 26, pomocí plášťových termočlánků typu K. Vstupní a výstupní tlak byl měřen pomocí tlakových snímačů s 0,5% chybou pro celý rozsah měření. Pár dvou měděných svorek byl přichycen na obou koncích testovacího úseku. Na obou koncích testovací sekce je umístěna příruba, která je od ní izolována teflonem.



Obr. 28 Testovací sekce [21]

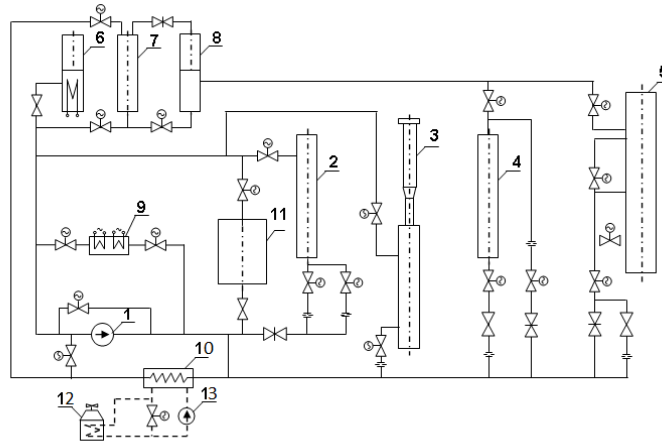
Experimenty byly prováděny s chladivem R-134a při různých vstupních hodnotách tlaku, hmotového toku, podchlazení, amplitudou a periodou kolébatého pohybu. Tepelná ztráta byla menší jak 2,5%. Průběh experimentů byl následující. Nejprve bylo zapnuto čerpadlo a průtok byl udržován pomocí ventilu na stálé hodnotě. Tlak v systému byl zvyšován pomocí předehříváče a regulován pomocí odvětrávání a vstřikování plynného dusíku do akumulátoru. Po dosažení požadovaného tlaku byla nastavena teplota pomocí předehříváče a chladicího zařízení. Poté byl na testovací sekci přiveden proud a jeho výkon byl zvyšován po malých krocích. KTT byl vyhodnocen jako prudké zvýšení vnější teploty trubky. Pohyblivý aparát se dal do pohybu těsně před tím, než byl připojen výkon na testovací sekci.

Ke kritickému tepelnému toku docházelo v blízkosti konce trubky. Při některých z nich docházelo ke kritickému tepelnému toku prvního druhu, při některých ke druhému druhu. Na zařízení byly prováděny experimenty za ustálených podmínek a stejně tak experimenty za pohybu zařízení. Poté byl definován poměr mezi hodnotami KTT za pohybu vůči hodnotám za ustálených podmínek. Z dosažených výsledků je patrné, že hodnota KTT závisí na hmotové rychlosti, tlaku a amplitudy pohybu. Poměr mezi kritickými tepelnými toky se snižuje se snižujícím se hmotovým tokem za středních tlaků 1,3 a 1,6 MPa. Všechny závislosti jsou ve zprávě o experimentu podrobně zpracovány včetně grafických výstupů. [21]

4.2.7 Experiment LWL

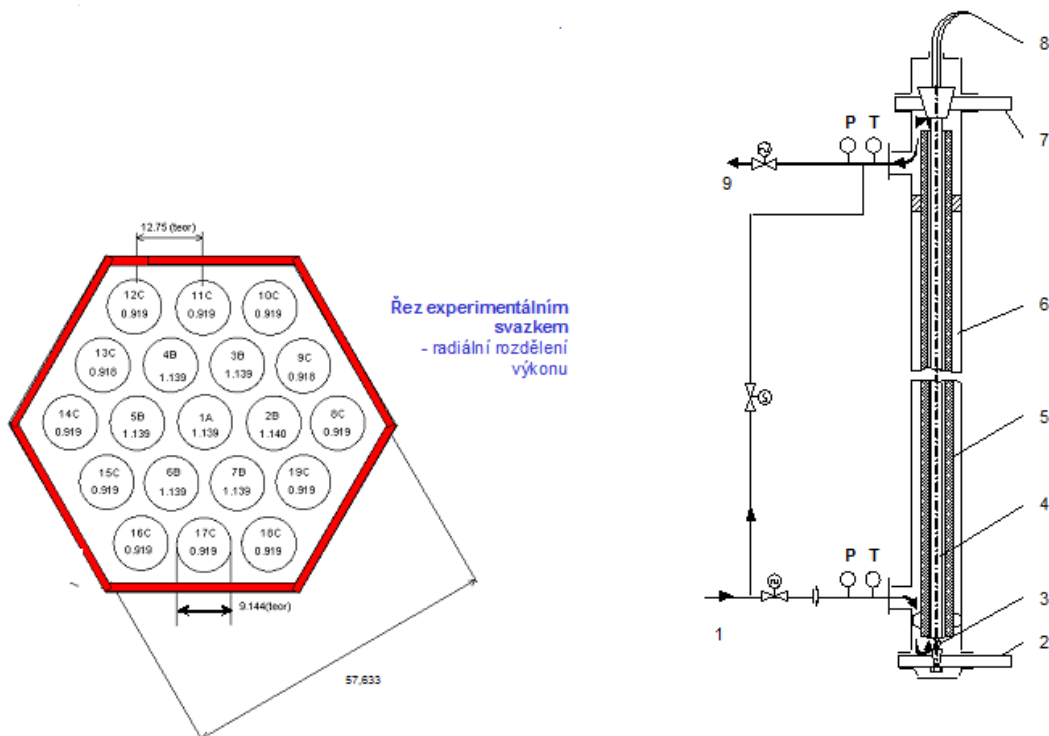
Mezi roky 1992 až 1994 byly prováděny experimentální práce v plzeňské firmě ŠKODA JS, a.s ve spolupráci s firmou WESTINGHOUSE. Jednalo se o experimenty pro licencování nového paliva pro jadernou elektrárnu Temelín, které mimo jiné zahrnovaly i testy kritických tepelných toků.

Experimenty byly prováděny na Velké vodní smyčce anglicky Large Water Loop (LWL). Smyčka na obr. 29 se skládá z čerpadla, experimentálních kanálů, kompenzátoru objemu, kondenzátoru, separátoru, ohříváku, chladiče, zařízení pro kontinuální čištění chladiva a zařízení sekundárního okruhu. Chladicí medium primárního okruhu byla demineralizovaná voda. Všechny součásti, které byly v kontaktu se chladícím medium, byly vyrobeny z nerezových materiálů. Provozní parametry primárního okruhu smyčky byly dimenzovány na maximální přetlak 20 MPa, maximální teplotu media 350 °C, elektrický příkon pro ohřev testovacího úseku 3,75 MW a maximální dodávané množství chladiva 200 m³/hod.

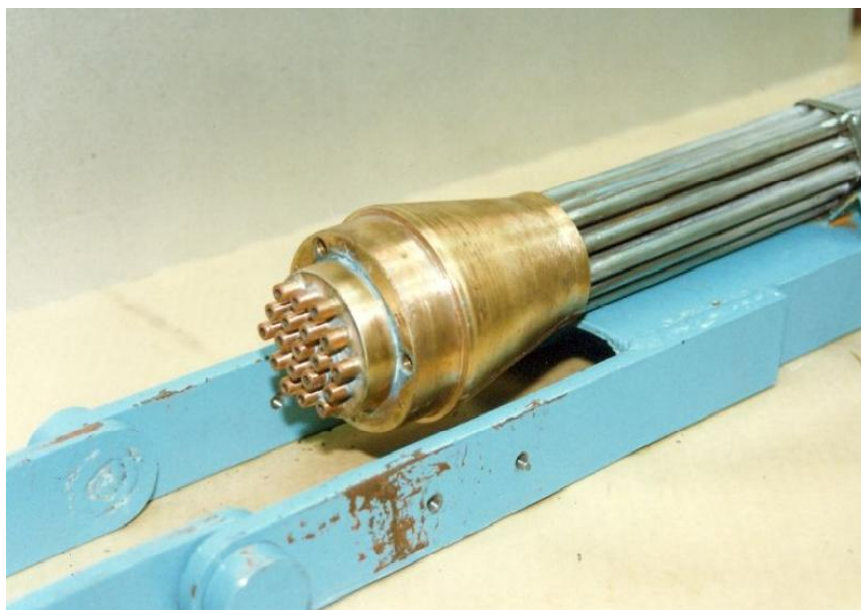


Obr. 29 Velká vodní smyčka; 1 – čerpadlo; 2, 3 – kanály pro zkoušky PRO, 4, 5 – experimentální kanály; 6 – kompenzátor objemu; 7 – kondenzátor; 8 – separátor; 9 – ohřívák; 10 – chladič; 11 – kontinuální úprava media; 12 – chladicí věž; 13 – čerpadlo pomocného okruhu [22]

V experimentálním kanálu na obr. 30 byly umístěny 19-ti prutové makety palivové kazety různých geometrických konfigurací. Tlakový kanál je vypouzdřen keramickými vložkami, které vytvářejí šestihorný průtočný profil a současně tvoří elektrickou izolaci mezi vytápěnou maketou a tělesem tlakového kanálu. Vlastní maketa je tvořena 19-ti nerezovými trubkami upevněnými v koncových kuželových hlavicích, na obr. 31, které jsou připojeny na elektrody.



Obr. 30 Testovací kanál; 1 – vstup chladiva; 2 – elektrické napájení; 3 – dilatační člen; 4 – experimentální svazek; 5 – keramická izolace; 6 – experimentální kanál; 7 – elektrické napájení; 8 – měření teploty; 9 – výstup chladiva [22]



Obr. 31 Kuželová hlavice se svazkem [22]

Maketa je vytápěna přímým průchodem stejnosměrného proudu. Uvnitř každé z trubek makety byly umístěny termočlánkové sondy, které umožňovaly zaznamenat průběh procesu a detekovat prudký nárůst teploty stěny, který je jednoznačným identifikátorem vzniku KTT. V každé maketě bylo 123 měřících míst. Experimenty byly realizovány na 7 maketách různých geometrických konfigurací modelujících různé profily vývinu tepla jak po průřezu, tak po délce a vliv „klastrové“ trubky. Nerovnoměrný vývin tepla po délce byl modelován proměnnou tloušťkou stěny po délce trubky.

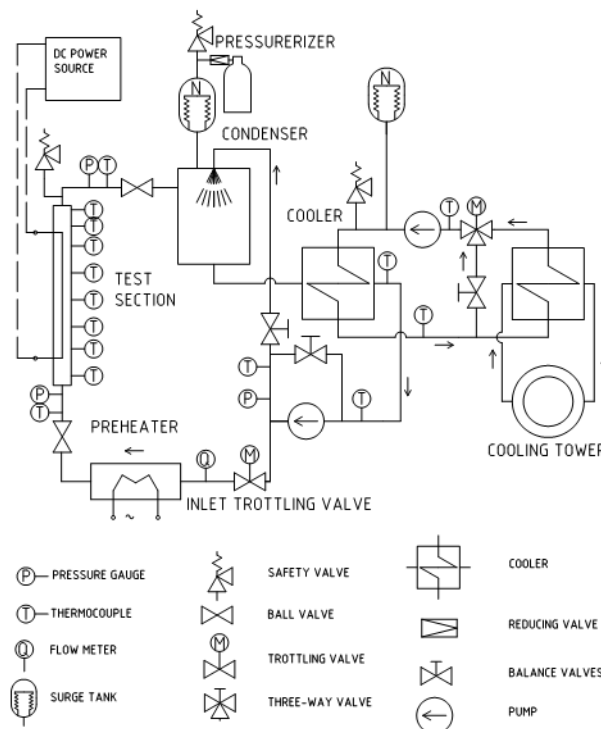
Prováděné experimenty probíhaly za tlaků 10 – 18 MPa, hmotové rychlosti 500 – 4500 kg/m²s, vstupní teploty 150 – 350 °C a elektrického příkonu do 3,5 MW, regulovatelného v 33 krocích s možností plynulé regulace mezi stupni. Průběh experimentu začal tím, že pro příslušnou geometrickou konfiguraci byla stanovena matice cca 80 – 100 bodů v rozsahu výše uvedených parametrů tak, aby pokud možno optimálně pokrývala definovaný rozsah. Pro tuto matici byly napočítány teoretické hodnoty KTT. Následně bylo nutné tuto matici korigovat s ohledem na omezení maximálního příkonu. V experimentálním zařízení se nastavily výchozí parametry zvolené bodu matice, maketa se přehřívala na povrchovou teplotu v bezpečné vzdálenosti od kritických parametrů a pomalým zvyšováním příkonu makety se dosáhlo KTT. Tento okamžik byl indikován prudkým nárůstem teploty některého ze 123 termočlánků instalovaných v měřících sondách. V tomto okamžiku bylo nutné příkon velmi rychle snížit, aby nedošlo k poškození makety. Následovalo přestavení výchozích parametrů pro další bod matice a postup se opakoval. Po odměření jedné konfigurace se maketa vyměnila a vše probíhalo obdobně jako u makety předchozí.

Výsledky těchto experimentů jsou majetkem firmy ŠKODA JS, a.s. [22]

4.2.8 Experiment VUT

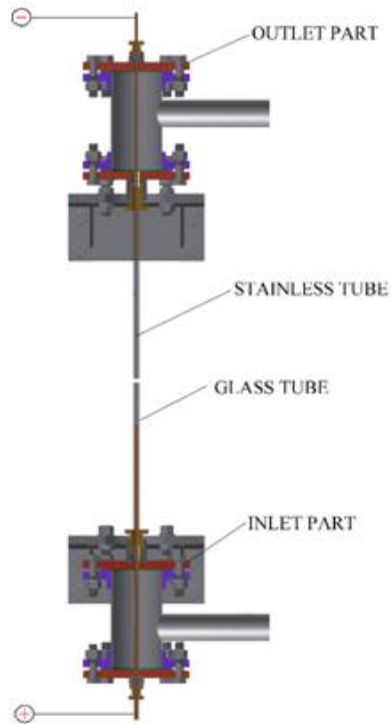
V roce 2014 je plánovaná výstavba experimentální tratě na Vysokém učení technickém v Brně pro studijní účely krize varu v rámci projektu Komplexní inovace studijních programů a zvyšování kvality výuky na FEKT VUT v Brně, který probíhá od 2. 4. 2012 do 1. 4. 2015. [23]

Experimentální smyčka na obr. 32 by měla pracovat s demineralizovanou vodou jako pracovním médiem. Rozsah pracovních tlaků by měl být od 0,15 MPa do 1,5 MPa a hmotnostní toků od 250 do 4000 kg/m²s.



Obr. 32 Plánovaná experimentální smyčka VUT [24]

Testovací sekce na obr. 33 je navržena jako dvě koaxiální trubky. Vnitřní nerezová bude mít vnější průměr 9,1 mm a bude vytápěna přímým průchodem stejnosměrného proudu v délce 700 mm. Vnější trubka bude skleněná a bude vyrobena ve dvou alternativách s vnitřním průměrem 12,6 a 18 mm. [24]



Obr. 33 Navržená testovací sekce [24]

4.2.9 Přehled experimentů

V této podkapitole bude uveden přehled prováděných experimentů v Tab. 1, popis jejich pracovního media, geometrie testovacího úseku, pracovních podmínek (rozsah tlaků p , hmotových rychlostí G , vstupního podchlazení h , vstupní suchosti x_i , tepelných toků q , výkonů P , vstupní teploty T_{in} , rychlosti proudění v a hmotnostní průtok Q).

Tab. 1 Přehled prováděných experimentů

Experiment	Medium	Geometrie	Podmínky
Mishima (1985) [27]	voda	mezikruží, obdélníkové kanály, kruhové trubky	$p = 0,1 \text{ MPa}$
El-Genk (1987) [28]	voda	mezikruží	$p = 0,118 \text{ MPa}$ $G = 0-260 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 155-1418 \text{ kWm}^{-2}$
Kumamaru (1988) [18]	voda	svazek 25 tyčí	$p = 3-12 \text{ MPa}$ $G = 20-410 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $x_i = 0,4-0,9$
ŠKODA JS a.s. (1992) [22]	voda	svazek 19 tyčí	$p = 10-18 \text{ MPa}$ $G = 500-4500 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $P = \text{max } 3,5 \text{ MW}$
Mudawar (1997) [11]	voda	kapilára $d = 0,406 \text{ a } 0,902 \text{ mm}$	$p = 0,25-17,24 \text{ MPa}$ $G = 5000-134000 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 9,4-276 \text{ MWm}^{-2}$
Chun (2002) [16]	voda	mezikruží	$p = 0,57-15,01 \text{ MPa}$ $G = 201-650 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $h = 86-353 \text{ kJ/kg}$
Lee (2002) [34]	voda	trubka vnitřní průměr 8 mm	$p = 101 \text{ kPa}$ $G = 403-2551 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $h = 306-376 \text{ kJ/kg}$
Moon (2004) [17]	voda	svazek 9 tyčí	$p = 0,47-15,06 \text{ MPa}$ $G = 49,66-654,44 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $x_i = 0,34-1,29$
Shin (2004) [33]	R134a	svazek 4 tyčí	$p = 1,47-2,57 \text{ MPa}$ $G = 1000-1800 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $h = 30-90,9 \text{ kJ/kg}$
Geping (2006) [32]	voda	mezikruží	$p = 2-4 \text{ MPa}$ $G = 26-69 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 10-70 \text{ kWm}^{-2}$
Chen (2010) [20]	R134a	spirálovitě vintutá trubka	$p = 0,3-1,1 \text{ MPa}$ $G = 60-480 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 6-90 \text{ kWm}^{-2}$
Zhao (2010) [31]	R134a	trubka vnitřní průměr 4,01 mm	$p = 4,5-5,5 \text{ MPa}$ $G = 70-405 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $T_{in} = 80-140 \text{ °C}$
Hwang (2011) [21]	R134a	trubka vnitřní průměr 9,5 mm	$p = 1,3-2,4 \text{ MPa}$ $G = 285-1300 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Wang (2012) [29]	voda	mezikruží	$p = 11-25 \text{ MPa}$ $G = 350-1000 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = \text{max } 600 \text{ kWm}^{-2}$
Mikielewicz (2012) [30]	R134a	trubka vnitřní průměr 1,15 mm	$p = 0,11-0,21 \text{ MPa}$ $G = 300-900 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 23-107 \text{ kWm}^{-2}$
Hata (2012) [19]	voda	trubka vnitřní průměr 6 mm	$p = 800 \text{ kPa}$ $v = 4-13,3 \text{ m/s}$ $h = 60,4-154,2 \text{ K}$
VUT (2014) ¹ [24]	voda	mezikruží	$p = 0,15-1,5 \text{ MPa}$ $G = 250-4000 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$

¹ Plánované zprovoznění experimentální tratě

4.3 Experimenty za přechodných podmínek

Při experimentech prováděných za ustálených podmínek lze získat celou řadu korelačních vztahů, popisující podmínky vzniku KTT. Pro simulaci podmínek, které mohou nastat v jaderném reaktoru, je nutné provádět experimenty, při nichž se mění různé parametry. Jde zejména o proudění chladiva, generovaný výkon a tlak v měřené sekci. Přitom je ověřována shoda mezi odpovídajícími korelačními vztahy a výsledky experimentů za přechodných podmínek. Dále bude uveden přehled vybraných experimentů.

Experimenty s proměnným průtokem chladiva můžeme rozdělit do dvou skupin. U jedné skupiny dochází pouze k úpadku (oscilacím) průtoku chladiva, u druhé dochází k úplnému zastavení průtoku. Souhrn těchto experimentů je zpracován v Tab. 2.

- Smirnov v roce 1973 prováděl experiment na jednoduché geometrii jedné tyče, 0,5 a 1,4 metrů dlouhé při snížení průtoku o 40 až 70% jeho původní hodnoty. Ustálená krize varu byla dosažena na stejné testovací sekci. S prudkým snížením hmotového průtoku vody byl vypočítaný čas do dosažení KTT kratší než při experimentu. Z toho plyne, že přechodný KTT byl větší než ustálený.
- Hein a Mayinger v roce 1972 shrnuly výsledky prováděných testů na jedné tyči, mezikruží a svazku čtyř a devíti tyčí. Jejich experimenty vykazovali dobrou shodu mezi přechodnými a proměnnými hodnotami KTT.
- Gaspari a kolektiv v roce 1973 použili přímo vyhřívané mezikruží, chlazené vodou při tlaku 5 MPa za účelem změření času do vzniku KTT druhého druhu. Výsledky experimentů dokazují, že korelace získané za ustálených podmínek mohou být použity k určení kritické doby za přechodných podmínek.
- Celata a kolektiv prováděli v roce 1986 experimenty s freonem R-12 na trubce s poloměrem 7,5 mm, délce 2,3 m a tlaků 1,25 – 3 MPa odpovídající podmínkám tlakových a varných reaktorů. Měřili časový interval od počátku změny průtoku do počátku KTT. Korelační vztahy obdržené za ustálených podmínek se ukázaly jako neadekvátní pro rychlé snížení průtoku, ale rozumně přesné pro pomalejší snížení průtoku.
- Lee a Lin prováděli v roce 1993 experimenty na jednoduché geometrii trubky za podmínek, které se vyskytují v tlakovém i varném reaktoru při snížení průtoku do jeho 30% původní hodnoty. Při použití korelačních vztahů došlo ke shodě s experimentálními výsledky při přechodných podmínkách.
- Iwamura a kolektiv v roce 1994 prováděli experiment na svazku 7 tyčí a za podmínek tlakovodních reaktorů, při snižování průtoku o 30%. Iwamura použil pro porovnání korelační vztah mající nejistotu okolo 10%. Přes tuto nejistotu obdržel přesnou shodu v předpovědi KTT.

Tab. 2 Experimenty s proměnným průtokem [9]

Experiment	Medium	Geometrie	Podmínky
Smirnov (1973)	voda	jednoduchá tyč	$p = 9,7 \text{ MPa}$ $G = 1000\text{-}3000 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 280\text{-}340 \text{ kWm}^{-2}$
Hein a Mayinger (1972)	R-12	jednoduchá tyč, mezikruží, svazek 4 a 9 tyčí	$p = 6,9; 13,8 \text{ MPa}$ $G = 1360 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 1420 \text{ kWm}^{-2}$ $p = 1,1 \text{ MPa}$ $G = 500\text{-}3500 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 320 \text{ kWm}^{-2}$
Gaspari (1973)	voda	mezikruží	$p = 4,9 \text{ MPa}$ $G = 136\text{-}2710 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 240\text{-}830 \text{ kWm}^{-2}$
Celata (1986)	R-12	trubka vnitřní pol. 10 mm délka 2300 mm	$p = 1,2\text{-}2,75 \text{ MPa}$ $G = 1000\text{-}1470 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 32\text{-}85 \text{ kWm}^{-2}$
Lee a Lin (1993)	voda	trubka vnitřní pol. 13,4 mm délka 3600 mm	$p = 6,9; 15,5 \text{ MPa}$ $G = 1960\text{-}3800 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 1,1\text{-}1,46 \text{ kWm}^{-2}$
Iwamura (1994)	voda	svazek 7 tyčí	$p = 13\text{-}15,5 \text{ MPa}$ $G = 2000\text{-}3200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $T_{in} = 260\text{-}310 \text{ }^\circ\text{C}$

Další experimenty, které jsou prováděny za přechodných podmínek, jsou experimenty mající za cíl simulovat havarijní situace při nekontrolovaném nárůstu výkonu. Souhrn těchto experimentů je zpracován v Tab. 3.

- Zielke a Wilson v roce 1974 prováděli experimenty na svazku 9 tyčí o délce 1,83 m. Při srovnání s použitými korelacemi se hodnoty KTT lišily okolo 5%.
- Aoki a kolektiv prováděli v roce 1976 rozsáhlé studie proměnného výkonu na mezikruží. Chování KTT rozdělili podle průtoku na 3 odlišné situace. Při velkých průtocích ($2100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) a velkém podchlazení se ukázalo, že KTT nezávisí na výkonu. Při průtocích dosahujících 50 – 70% docházelo ke kritickému tepelnému toku, které se velmi blížili hodnotám daných korelacemi. Při malých průtocích docházelo při zvyšování výkonu ke zvyšování hodnot KTT.
- Sugawara a Shiba testovali v roce 1987 svazek 36 tyčí při tlaku 7 MPa a hmotové rychlosti mezi 1500 – 2000 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Tepelný tok byl zvyšován až do hodnot 500% hodnoty původní. Hodnoty KTT při zvyšování výkonu odpovídaly hodnotám získaných z experimentů ustálených.
- Iwamura a kolektiv prováděli v roce 1994 experimenty simulující podmínky tlakovodního reaktoru na svazku 7mi tyčí při zvyšování výkonu o 120% jeho původní hodnoty. Po porovnání výsledků experimentu byla získána přesná shoda s hodnotami použitých korelačních vztahů.
- Inoue a kolektiv zkoumali v roce 2000 vliv zvyšování výkonu na KTT a došli k závěru, že se hodnoty shodují s hodnotami za ustálených podmínek.

Tab. 3 Experimenty při nárůstu výkonu [9]

Experiment	Medium	Geometrie	Podmínky
Zielke a Wilson (1974)	voda	svazek 9 tyčí	$p = 15,2 \text{ MPa}$ $G = 1360-4070 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Aoki (1976)	voda	mezikruží	$p = 2,1-7 \text{ MPa}$ $G = 0-2100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = \max 6000 \text{ kWm}^{-2}$
Sugawara a Shiba (1973)	voda	svazek 36 tyčí	$p = 2-7 \text{ MPa}$ $Q = 10-50 \text{ tun/hod}$ $q = 0,5-5,5 \text{ MW}$
Iwamura (1994)	voda	svazek 7 tyčí	$p = 13-15,5 \text{ MPa}$ $G = 2000-3200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $T_{in} = 260-310 \text{ }^\circ\text{C}$
Inoue (2000)	voda	zakřivený blok	$v = 1,1-12 \text{ m/s}$ $h = 30;60;80 \text{ K}$ $q = 0-50 \text{ MWm}^{-2}$

Informací o experimentech prováděných za proměnného tlaku je o mnoho méně, než o předchozích. Byly prováděny buď za konstantního, nebo proměnného výkonu z důvodu poklesu teploty sytosti kapaliny s poklesem tlaku a za proměnných průtocích. Souhrn těchto experimentů je zpracován v Tab. 4.

- Cermak a kolektiv prováděli v roce 1970 testy na svazku 21 tyčí tlakovodního reaktoru při počátečním tlaku 10,3 MPa. Na konci testovací sekce byla simulována ztráta tlaku. Hodnoty KTT byly měřeny na stejném testovacím aparátu. Předpokládaný čas vzniku KTT od tlakové ztráty byl 5,7 s a změřený čas při experimentu byl 7 s. Závěr z experimentů byl takový, že hodnoty KTT dostatečně korespondují s hodnotami získanými při ustálených podmínkách.
- Lawson prováděl v roce 1971 experimenty na jedné tyči i na svazku 7mi tyčí s tlakovou ztrátou na konci. Tlaková ztráta z počáteční hodnoty 10,3 MPa trvala od 12 do 60 s. Nebylo dosaženo žádného KTT, dokud nebyla testovací sekce na, nebo velmi blízko, hodnotě atmosférického tlaku a chladivo nebylo téměř vyčerpané. Ke kritickému tepelnému toku došlo zhruba za 4 sekundy od tlakové ztráty.
- Hicken a kolektiv zkoumali v roce 1972 vliv velikosti trhliny na tepelném toku na jednoduché geometrii trubky při počátečním tlaku 9 MPa. Jak se očekávalo, tlaková ztráta byla rychlejší při větších trhlinách.
- Shih v roce 1974 pracoval na experimentech s mezikružím a freonem jako chladicím médiem. Tlak freonového chladiva klesal z 1,12 MPa na 0,89 MPa během 1 – 4s, což je ekvivalentní tlakům 6,9 – 5,52 MPa pro vodu. KTT nastal mezi 1 – 4,3 s po tom, co tlak dosáhl své minimální hodnoty. [9]

Tab. 4 Experimenty při poklesu tlaku [9]

Experiment	Medium	Geometrie	Podmínky
Cermak (1970)	voda	svazek 21 tyčí	$p = 10,34 \text{ MPa}$ $G = 1350-4070 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 1900-3160 \text{ kWm}^{-2}$
Lawson (1971)	voda	mezikruží, svazek 7 tyčí	$p = 10,34 \text{ MPa}$ $G = 1350 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 1100 \text{ kWm}^{-2}$
Hicken (1972)	voda	trubka vnitřní pol. 13,8 mm délka 3000 mm	$p = 9 \text{ MPa}$ $q = 1650 \text{ kWm}^{-2}$
Shih (1974)	R-11	mezikruží	$p = 1,2 \text{ MPa}$ $G = 390-660 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $q = 100-140 \text{ MWm}^{-2}$

4.3.1 Měření experimentů

Pro měření experimentů KTT za přechodných podmínek je velice důležité použít nástroje schopné měřit důležité veličiny v jakýkoliv čas a na jakémkoliv místě testovací sekce. Mezi měřené veličiny patří teplota ohříváné tyče, tlak, hmotový tok, entalpie chladicí vody a tepelný výkon přenášený do chladiva.

K měření teploty stěny ohříváné tyče v jakémkoliv místě jsou použity termočlánky. Termočlánky jsou buď přímo připojeny k ohříváné stěně skrz kovový spoj, nebo skrz dielektrikum jako je např. keramika. Velice důležitým parametrem je pak doba odezvy termočlánku. Díky ní se dá zpětně spočítat přesný čas, ve kterém došlo ke krizi tepelného toku. Příliš dlouhá doba odezvy může celý experiment znehodnotit. Spolehlivá doba odezvy se pohybuje mezi 0,2 – 0,4 s. U přímého, kovového spoje, můžeme dosáhnout velice nízké odezvy okolo 0,1s. Tato metoda má i několik nevýhod plynoucích z problematické instalace a možné elektrické nerovnováhy. Další možností je použití pájených spojů. U této metody se dosahuje doby odezvy mezi asi 0,2 – 0,3 s. Metoda využívající pájení stříbrem termočládkové pláště k železné destičce spojené s ohříváním povrchem přes izolační vrstvu se ukázala jako nevhodná právě kvůli dlouhé době odezvy.

Pro kontinuální měření tlaku je k dispozici celá řada možných snímačů. Přitom musí být specifikována celková doba odezvy.

Velice obtížné je určování hmotového toku chladiva, když je dvoufázové proudění měřeno jak na začátku, tak na konci testovacího úseku. Celkový čas odezvy musí být opět přesně určen. Jedna z možností souvislého měření je založena na použití turbínového průtokoměru. Spolehlivost této metody ovšem není plně ověřena. Další metoda umožňuje diskrétní měření hmotového toku na částech testovací sekce. Metoda je založena na použití rychloventilu s uzavírací dobou menší než 0,01s. Nevýhodou této metody je to, že potřebuje několik opakování. Žádná ze zmíněných metod nedokáže měřit hmotový průtok podél měřeného úseku. Z dosavadních informací je patrné, že zbývá vyvinout ještě mnoho úsilí na zdokonalení tohoto měření, které je velice důležité pro stanovení KTT za přechodných podmínek.

Při přítomnosti jednofázové složky chladiva, ať už podchlazené vody nebo přehřáté páry, je měření teploty chladiva jednoduché. Ovšem při měření KTT existuje chladivo ve svých dvou fázích a měření se stává velice složité. Jedním z možných způsobů jak změřit entalpii chladiva je nejprve změřit objemový podíl páry, která

souvisí s kvalitou a tudíž s entalpií. Důležité je poznamenat, že objemový podíl páry je vyjádřen v podmínkách rychlosti skluzu. Rychlost skluzu je definována jako rozdíl mezi průměrnými hodnotami skluzů dvou různých kapalin proudících spolu v trubce. Ve vertikálním vzestupném proudu, lehčí kapalina proudí rychleji než těžší. Rychlost skluzu také závisí hlavně na rozdílu hustoty dvou různých kapalin. Měření objemového podílu páry je mnohem spolehlivější při použití optických vláken.

Měření výkonu přenášeného do chladiva je rovněž velice důležité, protože při proměnných podmínkách je často odlišný od generovaného výkonu. Určení toho výkonu je velice důležité, pokud se krize tepelného toku rozšiřuje a teplota ohřívání trubky kolísá podél celé délky měřeného úseku. To má velký vliv na generovaný výkon ohříváče, jehož elektrický odpor závisí na teplotě, tudíž je velmi užitečné souvislé měření proudu a napětí po délce měřené sekce. [9]

5. Závěr

Problematika kritického tepelného toku, respektive krize varu, je a troufám si tvrdit, že ještě určitou dobu bude, ne úplně objasněným fyzikálním jevem. Ten má kořeny v přestupu tepla při dvoufázovém proudění, čímž jsem se zabýval v první části této práce. Široký výskyt tohoto jevu v průmyslových aplikacích nutí vědecká pracoviště po celém světě pracovat na jeho objasnění a co nejhlubším pochopení.

Zvláště velký význam z bezpečnostního hlediska má tento jev při přestupu tepla z palivových článků tlakovodních reaktorů jaderných elektráren, kdy při nestandardním provozu může dojít k výskytu krize varu a poškození článků.

Možnost vzniku havárie na jaderném zařízení nelze, stejně jako u jiných zařízení, vyloučit se stoprocentní jistotou. Na světě je v současné době v provozu více než 430 jaderných reaktorů. S jejich rostoucím počtem vzrůstá i procento možné havárie. I přes velmi vysoké bezpečnostní protokoly, záložní systémy a nasbírané zkušenosti za 60 let od uvedení první jaderné elektrárny v Obninsku do provozu, je havárie na jaderném zařízení reálná.

Jediným možným způsobem, jak osvětlit problematiku krize varu a předejít tak nebezpečným scénářům nejenom jaderných havárií v budoucnosti, je provádění experimentů na stendech s různou geometrií a za různých pracovních podmínek. Právě s přibývajícím množstvím naměřených dat stoupá přesnost predikce KTT. Nutno podotknout, že finanční náročnost těchto experimentů je velká a nedovoluje jejich provádění každému. V tomto ohledu je připravovaná smyčka na VUT v Brně skvělou příležitostí pro navázání na dosavadní práci s možností jejího rozšíření o vlastní měření a zpracování experimentu. V této práci jsem se zabýval popisem a přehledem různých experimentů prováděných po celém světě za účelem osvětlení této složité problematiky. Z výsledků vyplývá, že se experimentální data často neshodují s daty korelačních vztahů pro dané podmínky.

6. Použitá literatura

- [1] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 434 s.
- [4] KUDRYASHOV, Nikolai A., Aleksandr V. KHLUNOV a Mikhail A. CHMYKHOV. Thermal regimes of high burn-up nuclear fuel rod. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* [online]. 2010, vol. 15, issue 5, s. 1240-1252 [cit. 2014-02-03]. DOI: 10.1016/j.cnsns.2009.05.063. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1007570409003402>
- [5] FLEISCHNER, Petr. *Hydromechanika*. 4., nezm. vyd. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1990, 232 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0226-1.
- [6] HOLLOWAY, Mary V., Donald E. BEASLEY a Michael E. CONNER. Single-phase convective heat transfer in rod bundles. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2008, vol. 238, issue 4, s. 848-858 [cit. 2014-02-03]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.08.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549307004463>
- [7] KIM, Jungho. Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2009, vol. 35, issue 12, s. 1067-1076 [cit. 2014-02-03]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.07.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932209001311>
- [8] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1981, 634 s.
- [9] AHMED, Wael H., Meamer A. EL-NAKLA a Basel I. ISMAIL. Towards understanding the critical heat flux for industrial applications. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2010, vol. 36, issue 3, s. 153-165 [cit. 2014-02-06]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.10.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932209001670>
- [10] *Natural circulation in water cooled nuclear power plants: phenomena models and methodology for system reliability assessments*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005. ISBN 92-011-0605-X.
- [11] MUDAWAR, Issam a Morris B. BOWERS. Ultra-high critical heat flux (CHF) for subcooled water flow boiling—I: CHF data and parametric effects for small diameter tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1999, vol. 42, issue 8, s. 1405-1428 [cit. 2014-02-10]. DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00241-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931098002415>
- [12] NEIL E. TODREAS, Neil E. Mujid S. Nuclear systems [online]. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor, 2012 [cit. 2014-03-08]. ISBN 1439808872.
- [13] KOVALEV, S. A. BURNOUT (FORCED CONVECTION). *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering* [online]. Begellhouse, 2006 [cit. 2014-03-08]. DOI: 10.1615/AtoZ.b.burnout_forced_convection. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/605/>
- [14] LIGHT, Truman S. a Stuart L. LICHT. Conductivity and resistivity of water from the melting to critical point. *Analytical Chemistry* [online]. 1987, vol. 59,

- issue 19, s. 2327-2330 [cit. 2014-03-11]. DOI: 10.1021/ac00146a003. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac00146a003>
- [15] *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 93rd ed. Editor William M Haynes, David R Lide, Thomas J Bruno. Boca Raton: CRC Press, c2012, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 978-1-4398-8049-4.
- [16] CHUN, Se-Young, Sang-Ki MOON, Heung-June CHUNG, Sun-Kyu YANG, Moon-Ki CHUNG, Masanori ARITOMI, K. MISHIMA a M. ISHII. Critical heat flux under zero flow conditions in vertical annulus with uniformly and non-uniformly heated sections. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2001, vol. 205, issue 3, s. 265-279 [cit. 2014-03-08]. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/5330015>. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF03016512>
- [17] MOON, Sang-Ki, Se-Young CHUN, Seok CHO a Won-Pil BAEK. An experimental study on the critical heat flux for low flow of water in a non-uniformly heated vertical rod bundle over a wide range of pressure conditions. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2005, vol. 235, issue 21, s. 2295-2309 [cit. 2014-02-11]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.04.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549305001147>
- [18] KUMAMARU, Hiroshige, Yasuo KOIZUMI a Kanji TASAKA. Critical Heat Flux for Uniformly Heated Rod Bundle under High-Pressure, Low-Flow and Mixed Inlet Conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 1989, vol. 26, issue 5, s. 544-557 [cit. 2014-02-13]. DOI: 10.1080/18811248.1989.9734345. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.1989.9734345>
- [19] HATA, K., Y. SHIRAI a S. MASUZAKI. Heat transfer and critical heat flux of subcooled water flow boiling in a HORIZONTAL circular tube. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2013, vol. 44, s. 844-857 [cit. 2014-02-14]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.10.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177712002701>
- [20] CHEN, Chang-Nian, Ji-Tian HAN, Tien-Chien JEN, Li SHAO a Wen-wen CHEN. Experimental study on critical heat flux characteristics of R134a flow boiling in horizontal helically-coiled tubes. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2011, vol. 50, issue 2, s. 169-177 [cit. 2014-02-15]. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.10.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1290072910002802>
- [21] HWANG, Jin-Seok, Yeon-Gun LEE a Goon-Cherl PARK. Characteristics of critical heat flux under rolling condition for flow boiling in vertical tube. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2012, vol. 252, s. 153-162 [cit. 2014-02-22]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.032. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549312003512>
- [22] Ing. Martin Wébr. – e-mail (Servis JE, Diagnostika a životnost komponent, martin.webr@skoda-js.cz) dne 5. března 2014
- [23] MATĚJKOVA, J. Konstrukční návrh zařízení pro studijní účely krize varu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.
- [24] Ing. Ladislav Suk – e-mail (vedoucí bakalářské práce, EÚ VUT v Brně, suk@eu.fme.vutbr.cz) dne 7. března 2014
- [25] VAFAEI, Saeid a Dongsheng WEN. Bubble formation on a submerged micronozzle. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2010, vol. 343,

- issue 1, s. 291-297 [cit. 2014-03-29]. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.08.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021979709010443>
- [26] RAHIM, Emil, Remi REVELLIN, John THOME a Avram BAR-COHEN. Characterization and prediction of two-phase flow regimes in miniature tubes. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2011, vol. 37, issue 1, s. 12-23 [cit. 2014-03-29]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.09.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932210001473>
- [27] MISHIMA, Kaichiro a Hideaki NISHIHARA. Effect of channel geometry on critical heat flux for low pressure water. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1987, vol. 30, issue 6, s. 1169-1182 [cit. 2014-04-03]. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90046-9](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(87)90046-9).
- [28] EL-GENK, Mohamed S., Stanley J. HAYNES a Kim SUNG-HO. Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1988, vol. 31, issue 11, s. 2291-2304 [cit. 2014-04-03]. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(88\)90161-5](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(88)90161-5).
- [29] WANG, Han, Qincheng BI, Zhendong YANG, Wu GANG a Richa HU. Experimental investigation on heat transfer characteristics of high pressures water in a vertical upward annular channel. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2013, vol. 45, s. 169-179 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.11.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177712003081>
- [30] MIKIELEWICZ, Dariusz, Jan WAJS, Michal GLIŃSKI a Abdul-Baset R.S. ZROOGA. Experimental investigation of dryout of SES 36, R134a, R123 and ethanol in vertical small diameter tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2013, vol. 44, s. 556-564 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.08.018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177712002336>
- [31] ZHAO, Chen-Ru a Pei-Xue JIANG. Experimental study of in-tube cooling heat transfer and pressure drop characteristics of R134a at supercritical pressures. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2011, vol. 35, issue 7, s. 1293-1303 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177711000859>
- [32] GEPING, Wu, Qiu SUIZHENG, Su GUANGHUI, Tian WENXI a Jia DOUNAN. CHF and dryout point in vertical narrow annuli. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2007, vol. 237, issue 22, s. 2175-2182 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.043. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549307002567>
- [33] SHIN, Byung Soo a Soon Heung CHANG. Experimental study on the effect of angles and positions of mixing vanes on CHF in a 2×2 rod bundle with working fluid R-134a. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2005, vol. 235, issue 16, s. 1749-1759 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.02.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549305000804>
- [34] LEE, Yong Ho, Dae Hun KIM a Soon Heung CHANG. An experimental investigation on the critical heat flux enhancement by mechanical vibration in vertical round tube. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2004, vol. 229, issue 1, s. 47-58 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.11.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549303003753>
- [35] FORSTER, H.K., GREIF R. Heat transfer to a boiling liquid – Mechanisms and correlations. *J. Heat Transfer* 81, 45. 1959