



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MEMBRÁNOVÁ STĚNA KOTLE S POKROČILÝM ŘÍZENÍM PRŮTOKU

THE MEMBRANE WALL OF THE BOILER WITH AN ADVANCED
FLOW CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Češla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Martin Češla
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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 diplomové práce:

Membránová stěna kotle s pokročilým řízením průtoku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou řízení průtoku vody ve výparných trubkách membránové stěny průtlačného kotle. Běžně používané využití statických clonek bude rozšířeno o možnosti využití dynamických clonek. Cílem práce je navrhnout a otestovat postup volby vhodných clonek pro jednotlivé výparníkové trubky pro dosažení požadované rovnoměrnosti hmotnostního toku/teploty na výstupu jednotlivých trubek.

Cíle diplomové práce:

1. Stručně představte koncepci průtlačného kotle s uvedením parametrů přispívajících k nevyrovnanému zatížení výparníkových trubek.
2. Zpracujte přehled možností využitelných pro řízení průtoku.
3. Pro zadanou membránovou stěnu stanovte požadavky na charakteristiky použitých členů ovlivňujících průtok v trubkách.
4. Pro zadanou stěnu realizujete návrh rozmístění členů řídicích průtok v trubkách a vyhodnoťte jejich přínos.

Seznam literatury:

Zeman V.: Parní kotle, Skriptum VUT

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá hydraulickými poměry ve výparnicích průtočných kotlů a popisuje problémy, které vznikají při proudění vody výparníkem. Zejména vznik aperiodické nestability výparníku a vznik hydraulické nerovnoměrnosti mezi jednotlivými varnicemi. V práci jsou popsány parametry, které způsobují vznik těchto problémů a jsou uvedena řešení k jejich odstranění. Vlastní výpočet je pak proveden pro výparník kotle K2 umístěného v elektrárně Chvaletice.

ABSTRACT

The master thesis deals with hydraulic characteristics of once-through boilers and describes the problems which may arise during the flow of water through the evaporator. Especially the formation of aperiodic instability of the evaporator and hydraulic uniformity amongst every steam generating tube. The thesis describes parameters, which cause these problems, and solutions how to deal with them. The calculation has been done for evaporator of the boiler called K2 located in power station in Chvaletice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průtočný kotel, membránová stěna, výparník, clona, aperiodická nestabilita, hydraulická charakteristika, dvoufázové proudění

KEY WORDS

Once-through boiler, membrane wall, evaporator, orifice, aperiodic instability, hydraulic characteristic, two-phase flow

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČEŠLA, M. *Membránová stěna kotle s pokročilým řízením průtoku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

11. května 2016

.....
Martin Češla

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Ing. Zdeňkovi Tomášovi, CSc. ze společnosti GE Power s.r.o. za cenné rady a poskytnutí materiálů potřebných k vypracování této práce.

OBSAH

1. Úvod	11
2. Průtočné kotle	12
2.1 Historie.....	12
2.2 Základní vlastnosti průtočného kotle.....	12
2.2.1 Bensonova koncepce	12
2.2.2 Sulzerova koncepce	13
2.2.3 Ramzinova koncepce	14
2.3 Současný vývoj průtočných kotlů.....	15
2.3.1 Znaky kotlů s nadkritickým tlakem	15
2.4 Výparníky průtočných kotlů.....	16
2.4.1 Výparník složen ze sekci	16
2.4.2 Výparník s vodorovným nebo svislým meandrem	17
2.4.3 Šroubovitě vinutý výparník	17
2.4.4 Stěny ohniště.....	18
2.4.5 Membránová stěna kotle.....	19
3. Hydrodynamika výparníku	20
3.1 Tlakové ztráty ve varnici.....	20
3.1.1 Tlaková ztráta třením	20
3.1.2 Tlaková ztráta zrychlením směsi	21
3.1.3 Hydrostatická tlaková ztráta	21
3.1.4 Tlaková ztráta místními odpory.....	22
3.2 Odvození rovnice hydraulické charakteristiky	22
3.3 Proudění v paralelních varnicích.....	25
3.3.1 Vliv koncentrace přívodu tepla na charakteristiku varnice	26
3.3.2 Vliv tlaku na charakteristiku varnice	27
3.3.3 Vliv teploty napájecí vody na charakteristiku varnice	27
3.3.4 Vliv přírůstku entalpie ve varnice.....	28
3.4 Opatření ke stabilizaci proudění průtoku výparníkem.....	29
3.4.1 Statické clonky.....	29
3.4.2 Dynamické clonky	29
3.4.3 Škrťací ventily.....	30
3.4.4 Rozdělovací čerpadlo.....	30
3.4.5 Had s odstupňovaným průměrem	31
3.4.6 Dýchací trubka.....	31
3.4.7 Předehřívání vody před výparníkem.....	32

4. Hydraulický výpočet výparníku kotle K2 elektrárny Chvaletice	33
4.1 Popis kotle	33
4.2 Výpočet tlakové ztráty výparníku	33
4.2.1 Výpočet tlakové ztráty varnice č. 22	37
4.3 Ověření aperiodické stability varnice.....	40
4.3.1 Schmidtovo kritérium ověření stability	40
4.3.2 Schnackenbergovo kritérium ověření stability:	42
4.4 Stanovení clonování k odstranění hydraulické nerovnoměrnosti	43
4.5 Optimalizování průměru clonek.....	51
4.5.1 Stejně clonky na vstupu do výparníku	51
4.5.2 Odstupňované clonování.....	56
5. Závěr	60
Seznam použité literatury	61
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	62
Seznam příloh.....	63

1. ÚVOD

Celosvětovým trendem je snaha o co možná neekologičtější způsob života. Naším cílem je ochrana ovzduší, a té chceme v energetice mimo jiné dosáhnout instalováním co největšího počtu obnovitelných zdrojů, které jsou svými vlastnostmi k životnímu prostředí přijatelnější než zdroje klasické. V České republice jde především o instalování solárních a větrných elektráren. Výkon těchto elektráren je velkou mírou závislý na aktuálním vývoji počasí a to způsobuje nestabilitu přenosové soustavy. Abychom dosáhli její stability, je nutný mnohem větší regulační rozsah klasických energetických zdrojů.

V této práci je popsána problematika hydrodynamiky výparníků průtočných kotlů. V těchto výparnících vzniká hydraulická nerovnoměrnost mezi jednotlivými varnicemi a objevuje se tzv. aperiodická nestabilita. Tyto problémy jsou odstraňovány škrticími orgány umístěnými na začátek varnic. Cílem této práce je ověřit zda výparník trpí aperiodickou nestabilitou a navrhnout vhodné škrticí orgány, které by svými vlastnostmi dokázaly odstranit hydraulickou nerovnoměrnost ve výparníku v rozmezí 50 % – 100 % jmenovitého výkonu kotle. Výpočet je proveden pro výparník kotle K2 umístěného v elektrárně Chvaletice.



Obr. 1 - Pohled na elektrárnu Chvaletice [7]

2. PRŮTOČNÉ KOTLE

2.1 Historie

Vynálezce průtočného kotle je Jacob Perkins, který v roce 1822 vynalezl kotel, ve kterém množství napájecí vody přesně odpovídalo množství páry na výstupu. V roce 1923 český inženýr Müller, který po emigraci do Spojených států přijal jméno Benson, vynalezl turbínu, jež pracovala při tlaku 103 bar (běžný tlak v té době byl okolo 17 bar). Aby se vyhnul problémům s dimenzováním stěny bubnu, vynalezl průtočný kotel pracující při vysokých tlacích. U tohoto kotle byl redukční ventil před vstupem do posledního přehříváku. Svůj patent poté prodal společnosti Siemens, jež kotle postavila v některých elektrárnách v Anglii, Belgii a Německu. Problémem těchto kotlů byla jednak jejich obsluha, stejně jako problémy s nedostatečnou kvalitou napájecí vody [10].

Současně byl v této době vynalezen bratry Sulzerovými průtočný kotel pracující v podkritické oblasti tlaků. Nepotřeboval tedy redukční ventil, stěny výparníku mohly být tenčí a napáječka měla menší spotřebu elektrické energie. V Rusku v té době pracoval na své koncepci konstruktér Ramzin. Základním znakem jeho kotle je meandrovitě vinutý výparník. Podrobný popis jednotlivých koncepcí bude popsán v následující kapitole.

Průtočné kotle se začaly nejvíce rozšiřovat ve třicátých letech v Evropě, kde byl na rozdíl od USA velký nedostatek oceli, a tak se začalo se stavbou těchto kotlů, jejichž jedna z výhod je právě menší náročnost na spotřebu oceli, protože odpadá těžký tlustostěnný kotlový buben [9].

2.2 Základní vlastnosti průtočného kotle

Charakteristickým znakem průtočného kotle je, že ohřívání vody z ekonomizéru, vypařování a její přehřev se děje v jedné trubce – výparníku. V případě větších výkonů v paralelně řazených varnicích. Množství vyrobené páry odpovídá množství napájecí vody. Cirkulační číslo takových kotlů je tedy 1.

Mezi jednotlivými výrobními úseky nejsou dány pevné hranice. Počátek vypařování je zpravidla na začátku sálavého výparníku, neboť v ekonomizéru se voda ohřívá až na teplotu blízkou bodu varu. Počátek i konec vypařování se mění s výkonem kotle, se stupněm zastruskování ohniště, se změnou teploty napájecí vody atp.

Rozdíl je také ve vlastnostech páry na vstupu do přehříváků. Zatímco u bubnových kotlů je buben hranicí, na níž se musí z páry důkladně odloučit veškerá voda, u průtočných kotlů tato ostře vyhraněná mez chybí. Rychle proudící směs ve varnicích totiž obsahuje zbytek vodní mlhy ještě na začátku přehříváku.

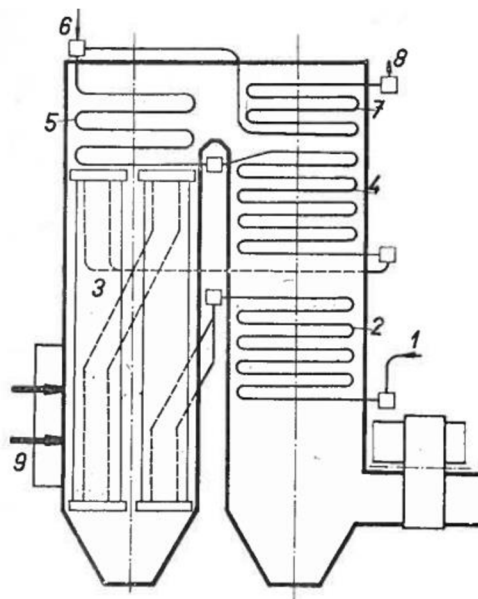
Průtočné kotle mají také rozdílnou regulaci, neboť odpadá hladina vody v bubnu, která je nejdůležitější složkou při regulaci bubnových kotlů. Kotel se reguluje tak, že se udržuje stálý poměr mezi průtokem vody napájené do kotle a tepelným výkonem ohniště. Jen tak lze při konstantní teplotě napájecí vody, udržet stálý tlak a teplotu kotlem dodávané páry.

2.2.1 Bensonova koncepce

Základní myšlenkou Bensonova kotle bylo vyrábět páru v nadkritické oblasti, kde odpadá oblast mokré páry. Voda tam přechází v páru bez změny objemu skokem, jak tomu bývá u podkritických parametrů. Rovněž není potřeba výparného tepla. V době vynálezu však ještě nebylo dostatek prostředků k provozu nadkritického oběhu do všech jeho důsledků. Proto se pára škrtila a teprve poté poháněla turbínu. Později se ukázalo, že nadkritických tlaků není potřeba a kotel spolehlivě pracuje i při tlacích nižších [6].

Schéma takového kotle je na obr. 2. Výparník kotle se skládá z většího počtu za sebou řazených trubkových sekcí, které mají vstupní a výstupní komory, mezi nimiž je skupina vedle sebe řazených svislých varnic.

U mnoha Bensonových kotlů se odpařování dokončuje v přechodníku, do něhož proudí mokrá pára obsahující přibližně 20 % vlhkosti. Přechodník je plocha umístěna v prvním tahu kotle, kde je již nižší teplota spalin a kde přestup tepla probíhá hlavně konvekcí. Dochází zde k největšímu usazování soli obsažených v napájecí vodě. V dnešní době se přechodník do Bensonových kotlů umísťuje jen výjimečně. To je dáno především vysokou kvalitou napájecí vody (demineralizovaná voda). Konec odpařování je v tomto případě dokončen v sálovém výparníku [4].



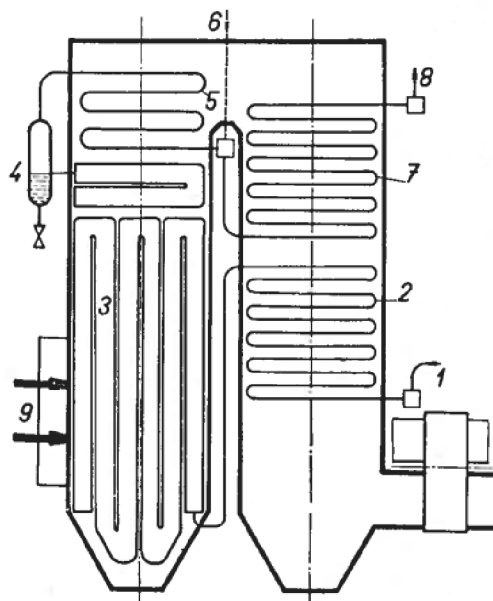
Obr. 2 - Bensonův kotel [6]

1 – přívod napájecí vody, 2 – ekonomizér, 3 – výparník, 4 – přechodník,
5 – sálový přehřívák, 6 – vstřík, 7 – konvekční přehřívák, 8 - odvod ostré páry, 9 - hořáky

2.2.2 Sulzerova koncepce

U Sulzerova kotle, jehož schéma je na obr. 3, se používá odlučováků vlhkosti. Napájení kotle se reguluje tak, že z výparníku vystupuje vlhká pára, která má kolem 5 % vlhkosti. Tato vlhkost, do které se má soustředit většina solí z odpařené vody, se odvádí z odlučováku jako odluh kotle. Proto kotel nepotřebuje přechodník. Odlučovák se však dá použít jen pro oblast podkritických tlaků, kde vedle sebe existuje kapalná i plynná fáze. V Sulzerově koncepci je proti Bensonově dán pevný konec odpařování, který je dán právě separátorem.

Odlučovák je však energeticky nevýhodný. Znamená zvětšení práce napájecího čerpadla, neboť se do kotle musí napájet více vody, krom toho se odluhem odvádí teplo. Odlučovák nemůže zabránit zanášení turbíny solemi, protože není schopen v páře rozpuštěné soli zachytit [3].

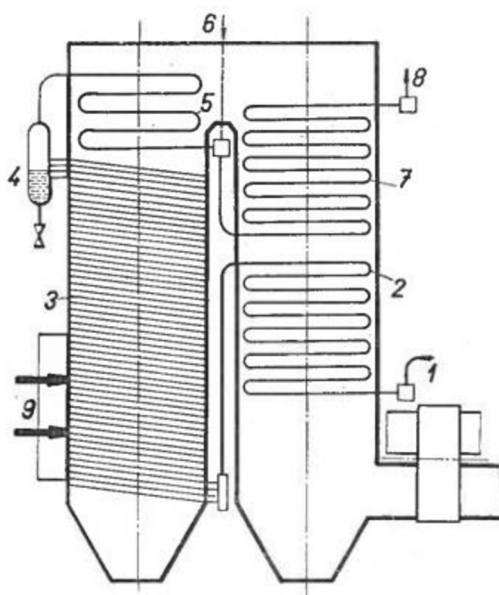


Obr. 3 - Sulzerova koncepce [6]

1 – přívod napájecí vody, 2 – ekonomizér, 3 – výparník, 4 – odlučovák vlhkosti,
5 – sálavý přehřívák, 6 – vstřík, 7 – konvekční přehřívák, 8 – odvod ostré páry, 9 - hořáky

2.2.3 Ramzinova koncepce

Znakem Ramzinova kotle (obr. 4) je šroubovitě vinutá plocha výparníku na stěnách ohniště, tvořena vodorovnými resp. mírně skloněnými varnicemi. Ramzinovy kotle mohou být se separátorem i bez něj. Stejně tak mohou i nemusejí mít přechodník. V tomto případě je konec odpařování umístěn v sálavých plochách kotle stejně jako u prvního kotle Ramzinova principu. Tento kotel byl postaven na tlak 14 MPa a měl olejové ohniště se stropními hořáky. Regulace probíhala tak, že pístová napáječka měla otáčky sladěny s otáčkami olejového čerpadla, jež dodávalo palivo do hořáků [6].



Obr. 4 - Ramzinova koncepce[6]

1 – přívod napájecí vody, 2 – ekonomizér, 3 – výparník, 4 – odlučovák vlhkosti,
5 – sálavý přehřívák, 6 – vstřík, 7 – konvekční přehřívák, 8 – odvod ostré páry, 9 - hořáky

2.3 Současný vývoj průtočných kotlů

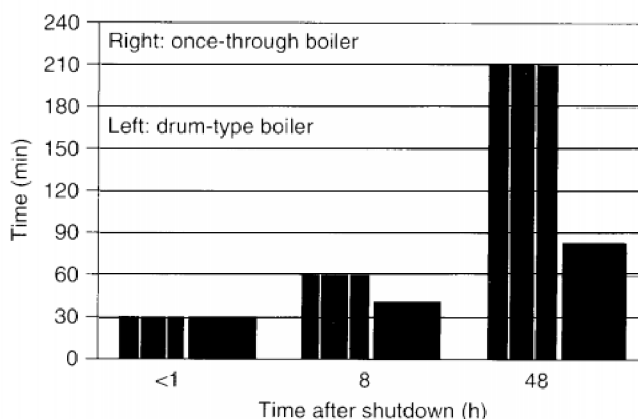
Jak šel vývoj kupředu, tak i výrobci kotlů optimalizovali jednotlivé nedostatky původních kotlů a dnes je již velmi těžké rozeznat o jakou koncepci se jedná. Například dnes mají meandrovitý výparník i Bensonovy kotle. Jednotlivé kotle se od sebe odlišují hlavně ve způsobu regulace.

Znakem všech moderních kotlů je však snaha o co možná nejvyšší tlak páry, možnost velkého rozsahu výkonu a v neposlední řadě také rychlost najíždění kotle (srovnání času najíždění bubnového a průtočného kotle je na obr. 5). Jak již bylo řečeno, původní Bensonův kotel vyráběl páru v nadkritické oblasti páry. V minulosti však kvůli nedostatku znalostí v oblasti vysokoteplotních materiálů nemohl být tento jev uplatněn v průmyslové praxi. V současné době díky velkému pokroku materiálového inženýrství můžeme naplno využívat výhod nadkritických kotlů.

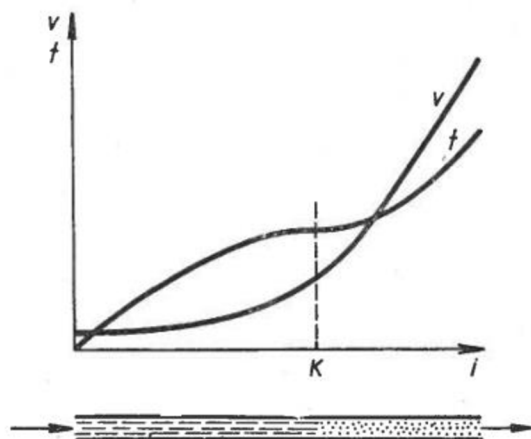
2.3.1 Znaky kotlů s nadkritickým tlakem

Při nadkritických tlacích (u vody je kritický bod dán tlakem 22 MPa a teplotou 373 °C) není již vnější rozdíl mezi stavem vody a páry. Voda přechází v páru beze změny objemu skokem, jak je znázorněno na obr. 6. V kotli je tedy při každé teplotě pouze jediná homogenní fáze. Zvýšení tlaků do nadkritické oblasti zvětšuje účinnost cyklu a tím přispívá ke snížení spotřeby paliva a produkci CO₂.

Strmý růst měrného tepla v okolí fázové změny způsobuje, že v kotlích s nadkritickým tlakem existuje úsek, kde se teplota fáze zvyšuje s entalpií jen velmi pomalu, takže tato část kotle je určitou analogií výparníků kotlů s podkritickým tlakem. V tomto místě se také prudce zvětšuje měrný objem fáze. V této části také mohou vzniknout podmínky pro výskyt nestabilního proudění ve výparníku (problém je popsán v kapitole 3.3) podobně jako u podkritických kotlů. Nadkritická fáze je se svými fyzikálními vlastnostmi velice podobná vodě, například má schopnost rozpouštět v sobě značné množství solí (proto byl původní Bensonův kotel bez přechodníku) [6].



Obr. 5 - Doba najetí bubnového (vlevo) a průtočného kotle [12]



Obr. 6 - Průběh teploty a měrného objemu fáze v okolí kritického bodu [6]

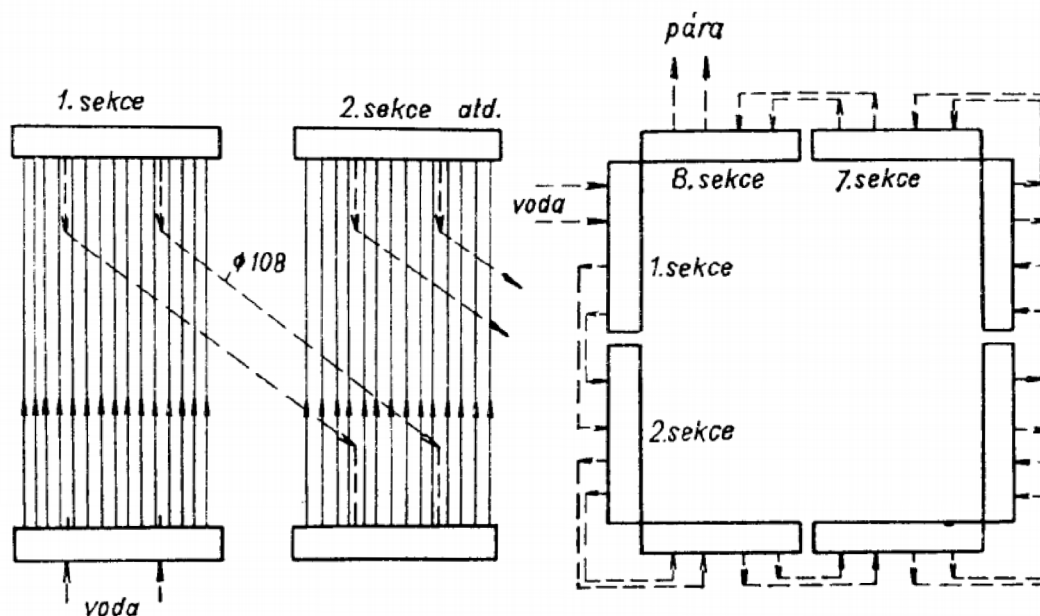
2.4 Výparníky průtočných kotlů

Výparníkem rozumíme místo v kotli, kde dochází k přeměně napájecí vody v páru. Výparník je vlastně jedinou součástí tlakové části průtočného kotle, která je odlišná od kotlů bubnových. Ekonomizér i přehřívák je identický. U průtočných kotlů rozeznáváme tři základní způsoby konstrukce výparníku:

- Výparník složen ze sekcí
- Výparník s vodorovným nebo svislým meandrem
- Šroubovitě vinutý výparník

2.4.1 Výparník složen ze sekcí

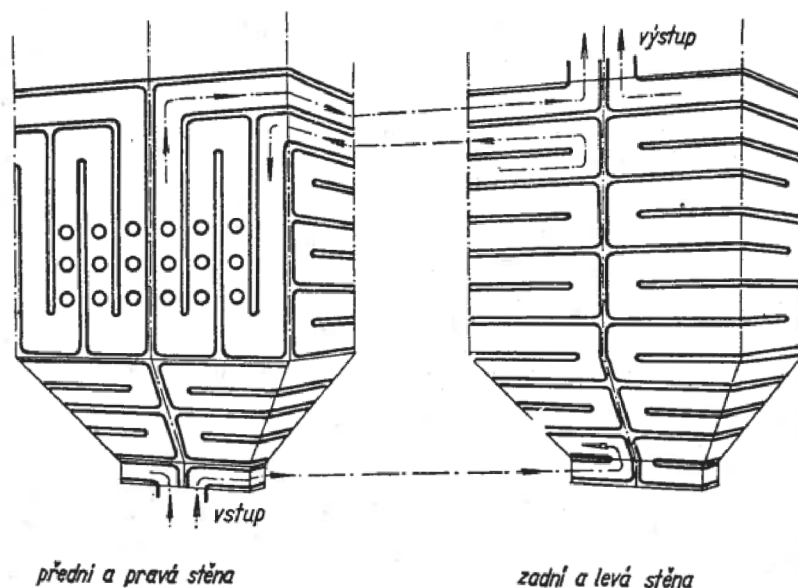
Výparník se sekcemi (obr. 7) je charakteristický pro klasické Bensonovy kotle. Skládá se z většího počtu za sebou řazených sekcí, na které je rozdělen pás varnic. Sekcí se rozumí úzká stěna z varnic omezené délky a šířky, která má nahoře a dole společnou komoru. Jednotlivé sekce jsou spojeny tzv. spádovými trubkami, které mají větší průměr než varnice a je jich menší počet. Výhodou tohoto výparníku je to, že není ohrožen eventuální nestabilitou proudění, jelikož jsou jednotlivé sekce v sérii, takže entalpická či teplotní nerovnoměrnost ohřivaného média na výstupu z jednotlivých sekcí je malá. Ve sběrné komoře a převáděcích trubkách dojde k opětovnému vyrovnání teploty, takže v další sekci vstupuje do všech paralelních varnic médium se stejnou entalpií. Další výhodou je to, že jednotlivé sekce jsou snadno vyrobitelné v dílně, takže bloková montáž na stavbě probíhá velice jednoduše. Sekce jsou dobře odvzdušnitelné a odvoditelné, což usnadňuje moření a konzervaci kotle při odstávkách. Velký počet komor jednotlivých sekcí a spádové trubky však způsobují to, že výstavba tohoto typu výparníku je velice nákladná [4].



Obr. 7 - Výparník se sekcemi [4]

2.4.2 Výparník s vodorovným nebo svislým meandrem

Meandrový výparník je původním znakem Sulzerova kotle. Meandr může být vodorovný či svislý. Po stránce stability proudění je výhodnější vodorovný meandr. Svislé meandry jsou výhodnější zejména z konstrukčního hlediska, neboť se v nich snáze umísťují hořáky. Svislé se však řadí až za vodorovné, neboť pak jimi protéká směs bohatá na páru, jejíž rychlost je značná a hustota malá, takže rozdíl vztlaků je nepatrný, viz obr. 8. Přírůstek entalpie v hadech bývá značný, proto je nutná zvýšená pozornost při zajištění rovnoměrnosti ohřevu všech paralelně řazených varnic, aby entalpie na výstupu z jednotlivých hadů nebyla příliš odlišná.

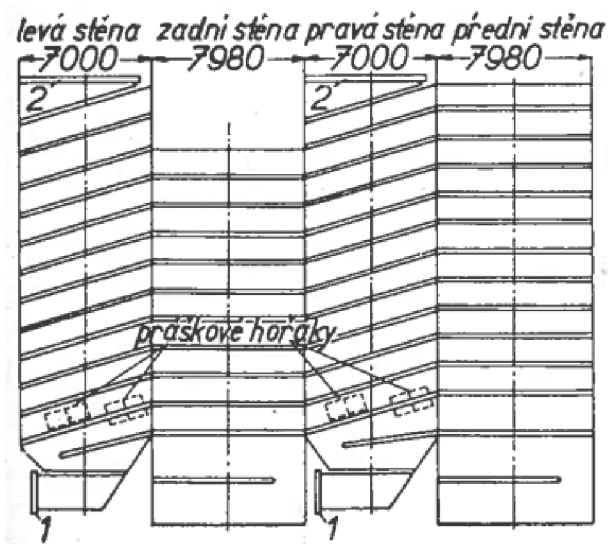


Obr. 8 – Řazení meandru ve výparníku [4]

2.4.3 Šroubovitě vinutý výparník

Pro Ramzinovy kotle je charakteristický šroubovitě vinutý výparník (obr. 9) sestavený z hydrodynamicky výhodných vodorovných resp. mírně skloněných varnic. Je vytvořen jako jednochodý nebo vícechodý závit podle výkonosti kotle, takže vznikne jedna nebo více

paralelních samostatně regulovatelných větví. Maximální šířka pásu by neměla překročit asi 1/3 hloubky ohniště, aby nerovnoměrnosti otápění nebyly příliš velké. Příklad vinutí je na obr. 9. Vodorovná varnice je vždy méně vhodná z hlediska možností rozvrstvení parovodní směsi a nestejně teploty vrchní a spodní části povrchu trubky. Proto se u šroubovitě vinutých varnic volí velkých rychlostí, aby vznikla dostatečná turbulence, která zabrání rozvrstvení. Průměr varnic se může volit odstupňovaný od 25 do 51 mm [5].



Obr. 9 - Šroubovitě vinutý výparník [6]

2.4.4 Stěny ohniště

Základní požadavky na stěnu ohniště jsou následující [9]:

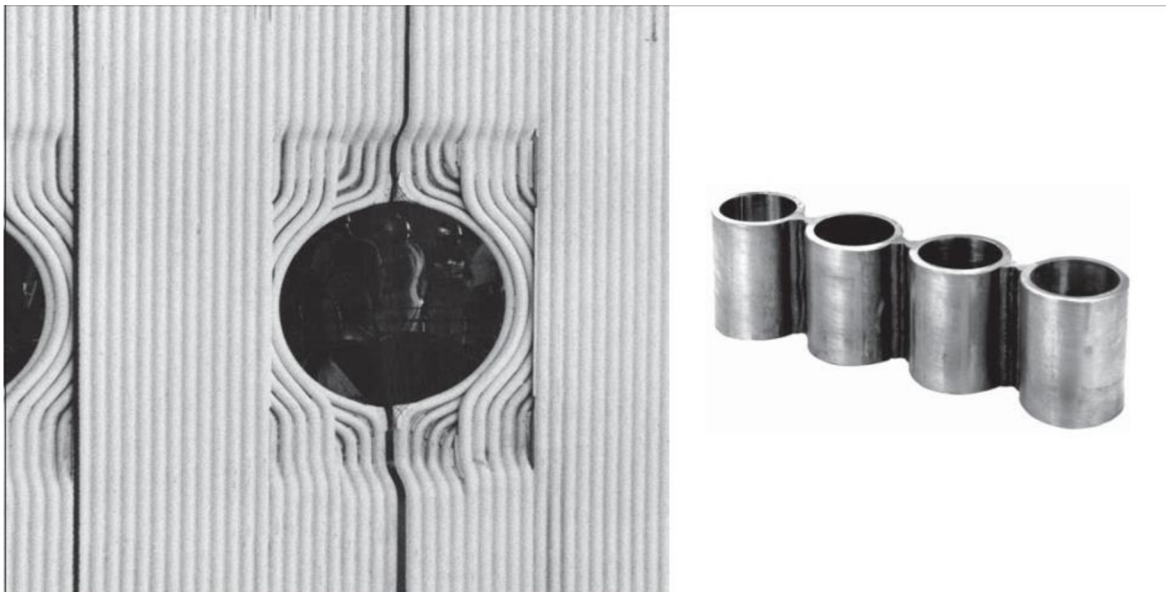
- Odolávat teplotám až 2000 °C.
- Stěna musí odolávat působení popílku a strusky, neboť při přílišném zastruskování dochází ke snížení přenosu tepla. Velké rychlosti popílku mohou také způsobit erozi stěny.
- Musí být správně navržena vzhledem k teplotním dilatacím.
- Celý systém musí být navrženo správně vzhledem k lokalitě, kde bude kotel postaven. Musí se zvážit přírodní podmínky jako je vítr, zemětřesení apod.
- Vibrace způsobené pulzacemi spalin musí být co nejmenší.
- Izolace stěn musí být navržena tak, aby nedocházelo k tepelné ztrátě sdílením tepla, která snižuje účinnost kotle.
- Stěna musí být velice těsná, aby nedocházelo k unikům spalin do okolí, popřípadě k nasávání vzduchu u podtlakových ohnišť.
- Údržba stěn musí být co nejjednodušší a jejich životnost vysoká.

2.4.5 Membránová stěna kotle

Významným konstrukčním znakem soudobého kotle je membránová stěna (obr. 10), jež vznikla z trubkové stěny s oplechováním na trubkách. Obejde se bez oplechování trubek a vyrábí se buď z hladkých trubek vyvařením úzkých plochých tyčí do mezer mezi trubkami, nebo svařováním trubek s naválcovanými žebry, které vytvoří souvislý panel. Hlavní výhodou membránové stěny je snížení hmotnosti, zejména v důsledku zmenšení potřebné tloušťky izolace a odpadnutí vnějšího oplechování. Je možný přetlakový provoz, avšak i při podtlakovém provozu se dosáhne lepší těsnosti, a tím i zmenšení komínové ztráty. Výroba vyžaduje speciální svařovací stroje a propracovanou technologii. Komplikovanější je i řešení z hlediska dilatačního, neboť se musí brát v úvahu dilatace v obou směrech [4].

Je možné trojí technologické provedení:

- Proveďte se jeden svar uprostřed ze strany ohniště, trubka má předem navařená žebra a je tepelně zpracována.
- Přivařuje se plochá ocel, přičemž se tepelné ovlivní tlaková část stěny, tj. vlastní stěna trubky. Proto je nutné mít malé výrobní tolerance plocháče i trubek.
- Proveďte se tzv. monostěna, kdy se z vytaveného kovu vytvoří přímo můstek mezi trubkami o šířce 3 – 4 mm.



Obr. 10 - Membránová stěna s výhybem pro hořák [10]

3. HYDRODYNAMIKA VÝPARNÍKU

3.1 Tlakové ztráty ve varnici

Tlaková ztráta výparníku je rovna součtu dílčích ztrát:

$$\Delta p = \Delta p_{tř} + \Delta p_{zr} + \Delta p_{st} + \Delta p_m \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

3.1.1 Tlaková ztráta třením

Tato ztráta je u průtočných kotlů největší ze všech dílčích ztrát. Můžeme ji vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_{tř} = \int_0^L \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \, dL \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Za předpokladu, že hodnoty za integračním znaménkem nezávisí na L a namísto hustoty dosadíme měrný objem, můžeme vztah přepsat:

$$\Delta p_{tř} = \lambda \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{v} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Rychlost proudění je známa ve výparnících jen výjimečně, proto je lepší si ji vyjádřit v závislosti na hmotnostním průtoku:

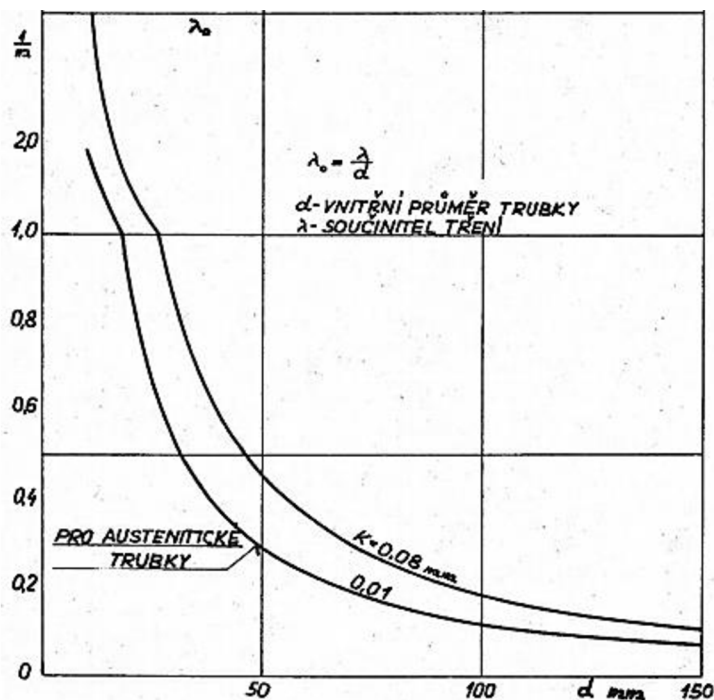
$$w = \frac{\dot{m} \cdot v \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4)$$

Po dosazení rovnice (4) do (3) dostaneme:

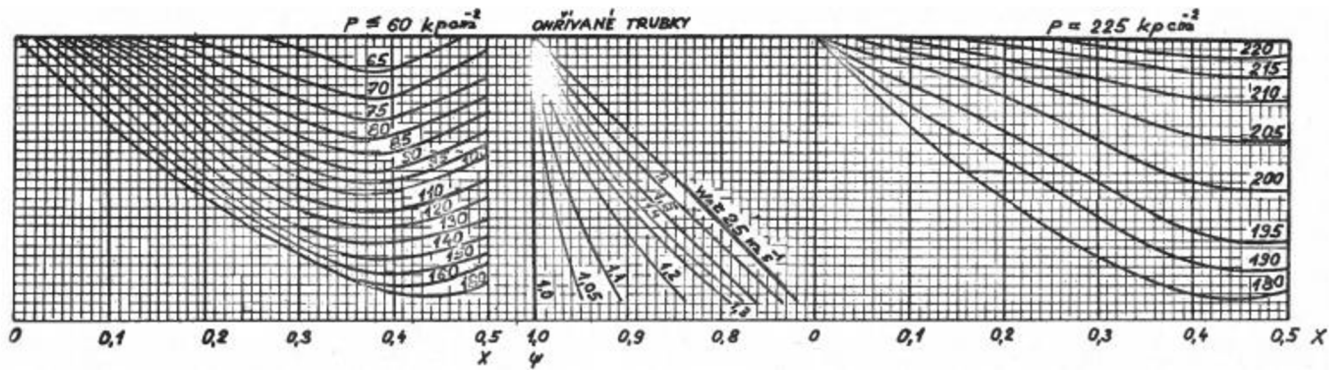
$$\Delta p_{tř} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{m^2}{d^5} \cdot v \cdot L \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

Obecně závisí součinitel tření λ na Reynoldsově čísle a na tzv. poměrné drsnosti vnitřního povrchu trubky ε/d a určuje se z Moodyho diagramu. Stanovení jeho hodnoty bývá pro dvoufázovou směs značně obtížné a zabývá se jím spousta publikací např. [1].

V této práci bylo vycházeno pro určení součinitele z publikace [14], postup určení hodnoty λ je zřejmý z obr. 11. Pro parovodní směs se poté součinitel násobí opravným součinitelem Ψ , který se určuje dle obr. 12.



Obr. 11 - Součinitele odporu třením pro kotlové trubky [14]

Obr. 12 - Určení opravného součinitele Ψ [15]

3.1.2 Tlaková ztráta zrychlením směsi

Tlakovou ztrátu zrychlením směsi můžeme vyjádřit:

$$\Delta p_{zr} = \frac{w_2^2}{2} \cdot \rho_2 - \frac{w_1^2}{2} \cdot \rho_1 \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

Tlaková ztráta zrychlením směsi neboli také dynamický tlak bývá u průtočných kotlů velmi malý. V literatuře [11] jsou uvedeny poměry tlakové ztráty zrychlením k tlakové ztrátě třením pro některé typy kotlů.

Pro výparník průtočného kotle s parametry:

$L = 350$ [m]; $x = 1$ [-]; $p = 19,5$ [MPa]; $d = 0,028$ [m]

$$\frac{\Delta p_{zr}}{\Delta p_{tř}} \doteq 0,013$$

Pro výparník s přídavnou cirkulací s parametry:

$L = 70$ [m]; $x = 0,78$ [-]; $p = 20$ [MPa]; $d = 0,020$ [m];

$$\frac{\Delta p_{zr}}{\Delta p_{tř}} \doteq 0,030$$

Pro výparník s nucenou cirkulací (La Mont) s parametry:

$L = 35$ [m]; $x = 0,28$ [-]; $p = 19$ [MPa]; $d = 0,028$ [m];

$$\frac{\Delta p_{zr}}{\Delta p_{tř}} \doteq 0,046$$

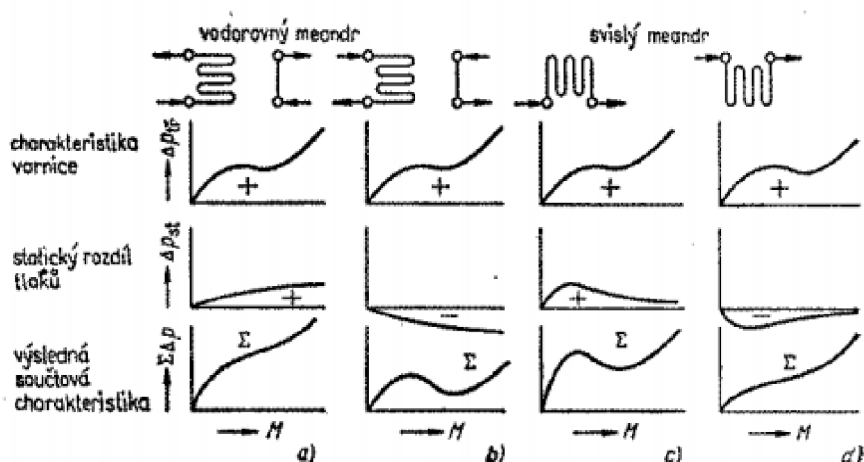
3.1.3 Hydrostatická tlaková ztráta

$$\Delta p_{st} = h \cdot g \cdot \frac{2}{v_1 + v_2} \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

Hydrostatická tlaková ztráta nazývaná také vztlak varnice má značný vliv při menších výkonech kotle a také tam, kde je poměr délky varnice k výšce výparníku blízký 1 (např. u parních generátorů v jaderných elektrárnách). Při proudění zdola nahoru má vztlak stabilizující účinek na varnici. Krom vztlaku má na pohyb vody ve svislých varnicích vliv i relativní rychlost bublin páry, které jsou lehčí a proto se pohybují rychleji než okolní voda. Tím napomáhají jejímu pohybu vzhůru nebo brzdí její pohyb dolů [11].

Vliv vztlaku a pohybu bublin je na obr. 13. U meandrů skládajících se ze svislých smyček je vliv vztlaku nepříznivý, neboť s rostoucím průtokem rozdíl statických tlaků na počátku a konci meandru nejdříve rychle roste, dosáhne maxima, a potom pozvolna klesá. Přičteme-li tento tlakový rozdíl k odporové charakteristice varnice, která je stabilní, stává se výsledná charakteristika labilní.

U vodorovných meandrů je tomu přesně naopak, neboť směs nikdy neproudí shora dolů. V tomto případě při součtu charakteristik vidíme, že vztlak má naopak stabilizující účinek na varnici.



Obr. 13 - Vliv vztlaku na charakteristiku varnice [3]

3.1.4 Tlaková ztráta místními odpory

Tlaková ztráta místními odpory vzniká především v ohybech výparníkového hadu, vstupem a výstupem do rozváděcí komory a v místech svarů jednotlivých trubek.

$$\Delta p_m = \sum \xi_m \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{1}{v} \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

Po dosazení rovnice (4) dostaneme:

$$\Delta p_m = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{m^2}{d^4} \sum \xi_m \cdot v \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

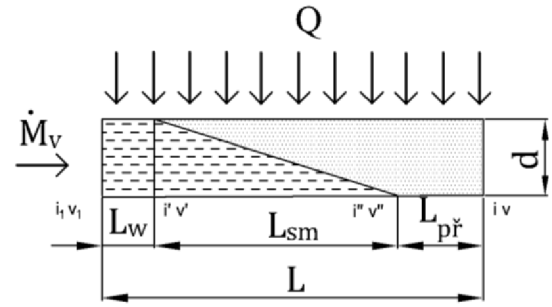
Pro součinitele místních ztrát ξ_m v ohybech varnic bylo při výpočtech v této publikaci využito empirického vztahu dle Weibacha [8].

$$\xi_m = \left(0,13 + 1,8 \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot r + d} \right)^{3,5} \right) \cdot \frac{\varphi}{90} \quad [-] \quad (10)$$

3.2 Odvození rovnice hydraulické charakteristiky

V následující kapitole bude odvozena rovnice hydraulické charakteristiky varnice pro zjednodušený případ, kdy je uvažována rovná varnice, bez místních odporů, při uvažování pouze tlakové ztráty třením.

V obecném případě přitéká do varnice na začátku voda a vystupuje přehřátá pára, viz obr. 14. Jestliže se trubka ohřívá rovnoměrně a po celé své délce L přijala množství tepla Q , pak je při počáteční entalpii vody i_1 vstupující do hadu, délka úseku, kde se voda dohřívá na teplotu varu (EKO část výparníku):



Obr. 14 - Zjednodušené schéma varnice

$$L_w = \frac{i' - i_1}{Q} \cdot \dot{m} \cdot L \quad [\text{m}] \quad (11)$$

Délka vypařovacího úseku je pak rovna:

$$L_{sm} = \frac{r}{Q} \cdot \dot{m} \cdot L \quad [\text{m}] \quad (12)$$

Délka přehřívacího úseku je:

$$L_{př} = L - L_w - L_{sm} = L \cdot \left[1 - \frac{\dot{m}}{Q} \cdot (i'' - i_1) \right] \quad [\text{m}] \quad (13)$$

Střední měrný objem směsi v ohřívací části:

$$v_w = \frac{v' + v_1}{2} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (14)$$

Po dosazení rovnice (11) a (14) do (5) dostaneme:

$$\Delta p_{tř,w} = K \cdot \lambda_w \cdot \frac{\dot{m}^2}{d^5} \cdot v_w \cdot L_w = K \cdot \lambda_w \cdot \frac{\dot{m}^3}{d^5} \cdot \frac{v' + v_1}{2} \cdot \frac{i' - i_1}{Q} \cdot L \quad [\text{Pa}] \quad (15)$$

Střední měrný objem na odpařovacím úseku:

$$v_{sm} = \frac{v' + v''}{2} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (16)$$

Po dosazení dostaneme:

$$\Delta p_{tř,sm} = K \cdot \lambda_{sm} \cdot \frac{\dot{m}^2}{d^5} \cdot v_{sm} \cdot L_{sm} = K \cdot \lambda_{sm} \cdot \frac{\dot{m}^3}{d^5} \cdot \frac{v' + v''}{2} \cdot \frac{r}{Q} \cdot L \quad [\text{Pa}] \quad (17)$$

Střední měrný objem na přehřívacím úseku vyjádříme jako:

$$v_{př} = \frac{v'' + v}{2} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (18)$$

Mezi měrným objemem na výstupu a entalpií platí vztah [14]:

$$v = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{0,238 \cdot i}{100} - 4,58 \right) \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (19)$$

Výstupní entalpie výparníku je:

$$i = \left(i_1 + \frac{Q}{\dot{m}} \right) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (20)$$

Po dosazení je tedy střední měrný objem na přehřívacím úseku:

$$v_{př} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{p} \cdot \left(\frac{0,238 \cdot i}{100} - 4,58 \right) + v'' \right] \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (21)$$

A tlaková ztráta tohoto úseku je:

$$\Delta p_{tř,př} = K \cdot \lambda_{př} \cdot \frac{\dot{m}^2}{d^5} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ v'' + \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{0,238}{100} \cdot \left(i_1 + \frac{Q}{\dot{m}} \right) - 4,58 \right] \right\} \cdot L \cdot \left[1 - \frac{\dot{m}}{Q} \cdot (i'' - i_1) \right] \quad [\text{Pa}] \quad (22)$$

Celková tlaková ztráta třením ve výparníku je rovna součtu všech úseků:

$$\Delta p_{tř} = \Delta p_{tř,w} + \Delta p_{tř,sm} + \Delta p_{tř,př} = \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^3 - B \cdot \dot{m}^2 + C \cdot Q \cdot \dot{m} \quad [\text{Pa}] \quad (23)$$

Tato rovnice se nazývá hydrodynamická charakteristika výparníku. V rovnici (23) závisí součinitelé A, B, C na tlaku, entalpii vody, součiniteli tření a geometrických parametrech trubky:

$$A = K \cdot \left[\lambda_w \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v' + v_1}{2} \cdot (i' - i_1) + \lambda_{sm} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v'' + v'}{2} \cdot r + \lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_2^5} \cdot (i'' - i_1) \cdot \left(\frac{2,29 - 0,00119 \cdot i_1}{p} - \frac{1}{2} v'' \right) \right] \quad \left[\frac{\text{kJ} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2} \right] \quad (24)$$

$$B = K \cdot \left[\lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \left(\frac{2,29 + 0,00119 \cdot (i'' - 2 \cdot i_1)}{p} - \frac{1}{2} v'' \right) \right] \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (25)$$

$$C = K \cdot \left[\lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \left(\frac{0,00119}{p} \right) \right] \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kJ} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (26)$$

V případě kdy by z varnice vystupovala jen mokrá pára, je její suchost:

$$x = \frac{1}{r} \cdot \left[\frac{Q}{\dot{m}} - (i' - i_1) \right] \quad [-] \quad (27)$$

Délka odpařovacího úseku je pak:

$$L_{sm} = L - L_w = L \cdot \left[1 - \frac{\dot{m}}{Q} \cdot (i' - i_1) \right] \quad [\text{m}] \quad (28)$$

Tlaková ztráta celé varnice:

$$\Delta p_{tř} = \Delta p_{tř,w} + \Delta p_{tř,sm} = \frac{A'}{Q} \cdot \dot{m}^3 - B' \cdot \dot{m}^2 + C' \cdot Q \cdot \dot{m} \quad [\text{Pa}] \quad (29)$$

Jednotliví součinitelé mají v tomto případě tvar:

$$A' = K \cdot \left[-\lambda_w \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v' - v_1}{2} \cdot (i' - i_1) + \lambda_{sm} \cdot \frac{L - L_r}{d_1^5} \cdot (i' - i_1)^2 \cdot \frac{v'' - v}{2 \cdot r} + \lambda_{sm} \cdot \frac{L_r}{d_2^5} \cdot (i' - i_1)^2 \cdot \frac{v'' - v}{2 \cdot r} \right] \quad \left[\frac{\text{kJ} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2} \right] \quad (30)$$

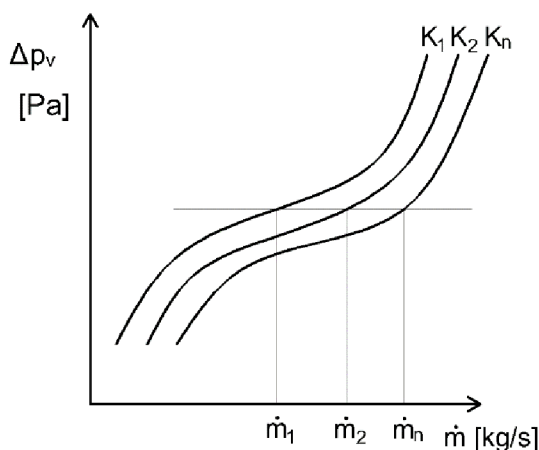
$$B' = K \cdot \left[+\lambda_{sm} \cdot \frac{L_r}{d_1^5} \cdot (i' - i_1) \cdot \frac{v'' - v}{r} - \lambda_{sm} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot v' \right] \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (31)$$

$$C' = K \cdot \left[\lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v'' - v}{2r} \right] \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kJ} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (32)$$

3.3 Proudění v paralelních varnicích

Jednotrubkové průtočné kotle se staví do výkonu jen několika tun páry za hodinu, maximálně 10 – 12 t·h⁻¹. Z pevnostních důvodů se výkon jednotrubkových kotlů zmenšuje se vzrůstajícím tlakem, neboť je třeba volit tlustostěnné trubky malých průměrů. Proto je u kotlů větších výkonů výparník sestaven z paralelně řazených varnic [6].

Je-li výparník složen z varnic s rozdílnými geometrickými tvary, které mají různé charakteristiky označené K₁, K₂,...K_n, určí se průtok vody jednotlivými varnicemi podle obr. 15, ze kterého lze pro každou tlakovou ztrátu výparníku Δp_v odečíst příslušný průtok varnicí m₁, m₂,... m_n.



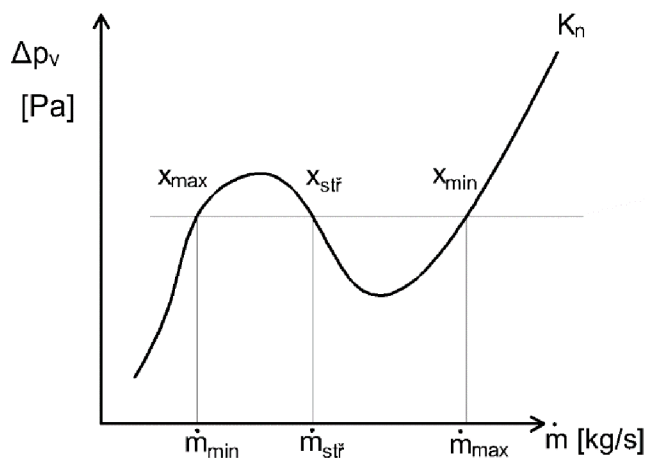
Obr. 15 - Charakteristiky jednotlivých varnic

Celkový průtok vody svazkem při daném Δp_v je pak určen:

$$\dot{M}_v = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dots + \dot{m}_n \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (33)$$

I kdyby byl výparník sestaven z varnic z geometricky naprosto stejných a stejně intenzivně otápaných varnic, bylo by přesto možné, že při stejném Δp_v mezi vstupním a výstupním sběračem výparníku, protékalo varnicemi různé množství vody. Takový jev nastává, pokud má výparník sedlovitou charakteristiku, viz obr. 16. Různé množství vody odpovídá také

různému obsahu páry na výstupu z varnice. Tento jev se nazývá aperiodická nestabilita výparníku.



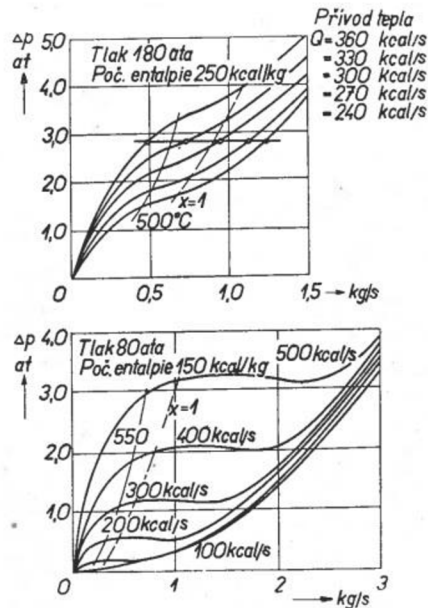
Obr. 16 - Sedlovitá charakteristika varnice

Tato nestabilita může být pro varnice značně nebezpečná, neboť při velmi malém průtoku vody varnici už pracovní látka nestačí chladit stěny trubky a může být překročena maximální přípustná teplota trubky, tím dochází k jejímu poškození.

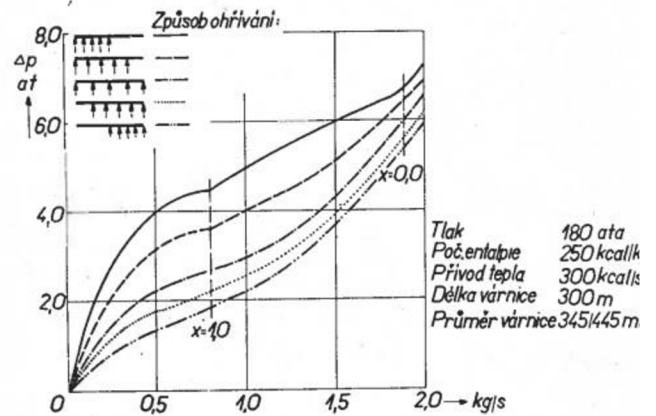
3.3.1 Vliv koncentrace přívodu tepla na charakteristiku varnice

Jak ukazuje obr. 17 při koncentraci tepla na počátku varnice má její charakteristika strmější průběh, neboť většina páry vznikne již na počátku varnice a její měrný objem a rychlosti jsou značně vysoké. Strmost charakteristiky klesá při rovnoměrném příkonu tepla a je nejmenší, je-li největší příkon tepla až v její druhé polovině.

Z hlediska tlakové ztráty je tedy výhodné, aby počátek výparníku byl umístěn v méně otápné části ohniště např. ve výsypce. Toto umístění je také výhodné z hlediska stability, neboť na obr. 18 můžeme vidět, že charakteristika s větším tepelným tokem v druhé polovině ohniště monotónně stoupá.



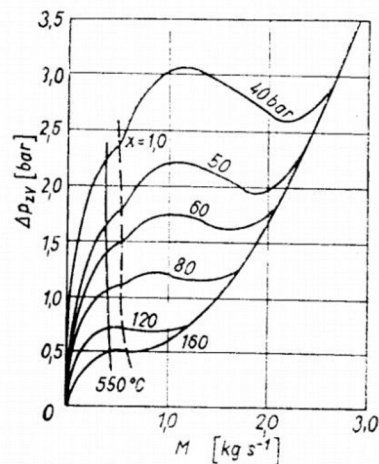
Obr. 17 – Vliv rozdílného příkonu tepla na charakteristiku varnice [6]



Obr. 18 – Vliv rozdílné polohy příkonu tepla na tvar její charakteristiky [6]

3.3.2 Vliv tlaku na charakteristiku varnice

Na obr. 19 je patrné, že čím větší je tlak ve varnici, tím méně je výrazný sedlovitý tvar křivky. U bubnových kotlů s přirozeným oběhem vody se podmínky oběhu vody výparníkem zhoršují, u průtočného kotle má však vyšší tlak ve varnici pozitivní účinek na proudění. Nejvíce stabilní jsou průtočné kotle, které pracují nadkritické oblasti, neboť se u nich nevyskytuje dvoufázové proudění a tím i příčiny, které v oblasti nízkých tlaků, způsobovaly sedlovitý průběh charakteristiky.



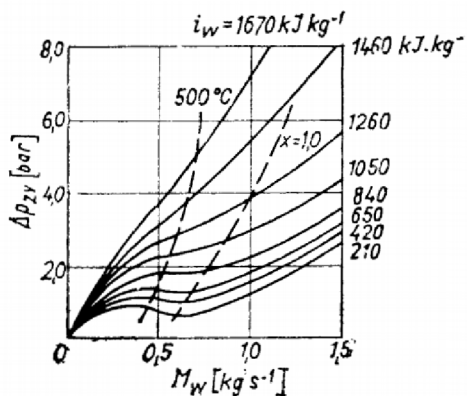
Obr. 19 - Vliv tlaku na charakteristiku varnice [4]

3.3.3 Vliv teploty napájecí vody na charakteristiku varnice

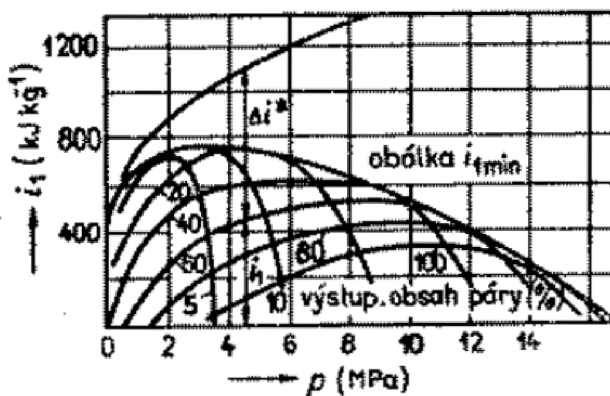
Charakteristika výparníku se stává stabilnější, je-li teplota napájecí vody co nejblíže teplotě varu. V [5] se uvádí, že by entalpie napájecí vody měla být jen o cca 150 – 200 kJ · kg⁻¹ nižší než je mez sytosti vody. Podobné pokyny jsou i v [2], kde se uvádí, že by teplota napájecí vody měla být maximálně o 30 °C menší, než je teplota varu vody. Závislost je zobrazena na obr. 20.

3.3.4 Vliv přírůstku entalpie ve varnici

Na stabilitu proudění má vliv i velikost přírůstku entalpie ve varnici. Tento vliv je znázorněn na obr. 21, který zachycuje závislost mezi tlakem, entalpií vody vystupující do varnice a suchostí páry x na výstupu z varnice. Z diagramu se odečte minimální vstupní entalpie vody potřebná k tomu, aby při určitém tlaku udaný koncový obsah páry ve směsi nenarušil stabilitu proudění. Křivky stejného obsahu páry mají výrazné maximum. Z křivek lze soudit, že při malých tlacích a velkém obsahu páry ve směsi je proudění stabilní a počáteční entalpie je velmi malá. Kritický je malý obsah páry vyžadující největší entalpii vody.



Obr. 20 - Vliv entalpie vody na začátku varnice na tvar charakteristiky [4]

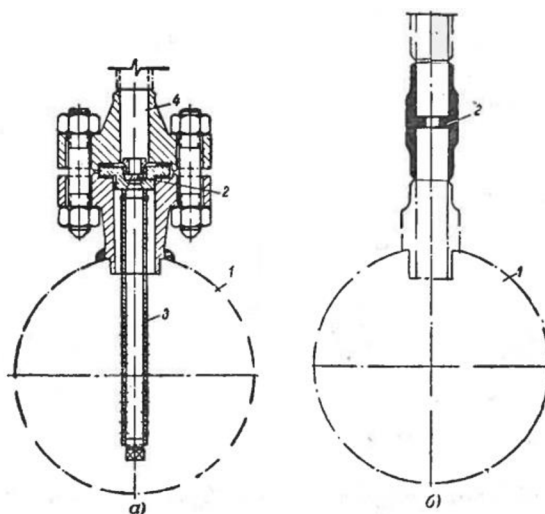


Obr. 21 - Vliv tlaku a výstupní suchosti mokré páry na minimální vstupní entalpii vody potřebnou pro stabilní proudění [3]

3.4 Opatření ke stabilizaci proudění průtoku výparníkem

3.4.1 Statické clonky

Nejrozšířenějším a nejjednodušším způsobem k zrovnoměnění průtoku vody výparníkem a ke stabilizaci je clonka. Clonka s otvorem průměru několik milimetrů se umísťuje na začátek varnice vně dolní rozdělovací komory. Před samotnou clonkou je umístěno sítko s velkým počtem ok malých průměrů, aby nedošlo k ucpaní clony. V minulosti se clona umísťovala do přírubového spoje, dnes se již výhradně vevaňuje. Přírubový spoj je totiž vždy eventuálním zdrojem netěsností. Výměna vevařené clonky ovšem znamená její vyříznutí, úpravu průměru otvoru a znovu zavaření do varnice. Tento postup se musí opakovat i několikrát, neboť hydrodynamický výpočet kotle bývá značně nepřesný. Clony se vyrábí z nitridové oceli, která je velmi tvrdá a odolává abrazi. Používá se clon válcových, pro které platí $L_{cl} \gg d_{cl}$.



Obr. 22 - Statická clonka [6]

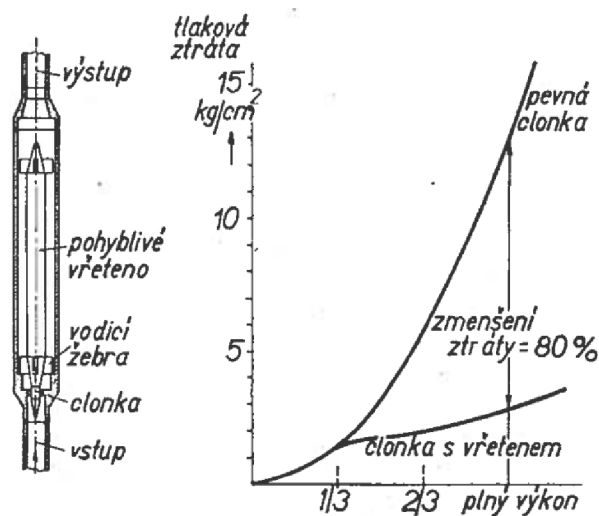
3.4.2 Dynamické clonky

Velkou nevýhodou statických clonek je fakt, že se snižujícím se parním výkonem kotle klesá i průměr clonky nutný k zrovnoměnění průtoku výparníkem. Malý průměr clonek pak při velkém výkonu kotle způsobuje značnou tlakovou ztrátu, a tím snižuje ekonomiku bloku, neboť je třeba zvýšené čerpací práce napáječky.

Tento problém řeší tzv. dynamické clonky. Schéma takové clonky je na obr. 23. Do otvoru clonky zasahuje spodní kuželovitý konec vřetena, který má určitou váhu a je volně veden v trubce křídly navařenými na jeho povrchu. Vřeteno musí být vloženo do svislé nebo málo skloněné trubky, aby jeho váha působila proti dynamickým účinkům vody. Spodní kužel vřetena zmenšuje průtočný průřez clonky, takže i při malých průtocích vody trubkou klade clonka vodě značný odpor. S rostoucím průtokem roste dynamický tlak vody na vřeteno, až se vřeteno nadzvedne. Tím se ovšem zvětší průtočný průřez v clonce a vřeteno se ustálí v nové poloze. Konečně při určitém průtoku, kdy odpor vřetena proti proudu vody je větší než jeho váha, vyklouzne vřeteno z clonky, která má pak při větších průtocích odpor daný jen svým otvorem, neboť vřeteno se vznáší v prostoru nad clonkou. Jakmile průtok poklesne, vřeteno se vlastní vahou vrátí svým spodním koncem do clonky.

Na obr. 23 je nakreslena také charakteristika clonky s vřetenem. Z obrázku je zřejmé, že odpor clonky, pokud je v ní vřeteno, rychle roste. V oblasti, kde se vřeteno nadzvedává, a tím se pozvolna zvětšuje otvor clonky, zůstává odpor clonky stálý, rovný váze vřetena. Teprve po úplném vyklouznutí vřetena z clonky se její odpor dále zvětšuje. Značný pokles jejího odporu

v oblasti velkých průtoků je zřejmý, takže úspora na tlakové ztrátě dosažená clonkou s vřetenem je podstatná [6].



Obr. 23 - Dynamická clonka [6]

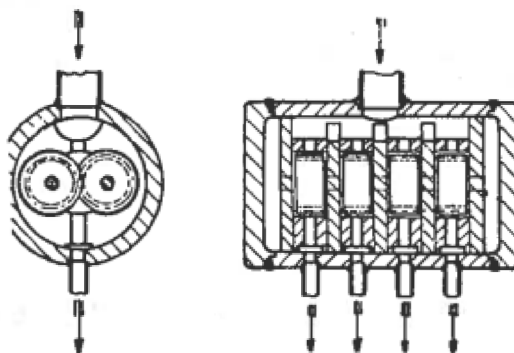
Vývoji dynamických clonek byla věnována velká pozornost na začátku 70. let, jak dokládají i patenty [13, 14]. Z důvodu velké provozní nespolehlivosti však nikdy nedošlo k jejich průmyslové aplikaci. Clony jsou zvenčí nepřístupné, a tak když dojde k jejich uvíznutí, musí se celá clona vyříznout a nahradit novou. Polohu clony také nelze zvenčí kontrolovat, proto na její uvíznutí upozorní až zvýšená teplota páry na výstupu z varnice. V tuto chvíli však už může být varnice nenávratně poškozena.

3.4.3 Škrťací ventily

Škrťací ventily, které jsou velice nákladné, se uplatňují především u Sulzerových kotlů s menším počtem varnic větších průměrů. U kotlů s velkým počtem varnic by byla instalace na každou z nich velice nákladná. Největší výhoda škrťacího ventilu je to, že umožňuje postupné otevírání, a tím nedochází k tak velkému nárůstu tlakové ztráty jako u stacionární clonky.

3.4.4 Rozdělovací čerpadlo

Pro rovnoměrné rozdělení vody do varnic bez použití přídavného odporu na počátku varnic je možno použít rozdělovací zubové čerpadlo. Kola všech čerpadel jsou stejná a mají společný pevný hřídel. Otáčení kol je vynuceno tlakem napájecí vody, takže zařízení nepotřebuje motor a nemá žádné ucpávky, kterými by mohla unikat voda navenek a které by vyžadovalo velkou údržbu. Jednotlivá čerpadla jsou od sebe oddělena mezistěnami. Největší problém čerpadel je jeho mazání a opotřebení, neboť kola nejsou z vnějšku přístupná [4].



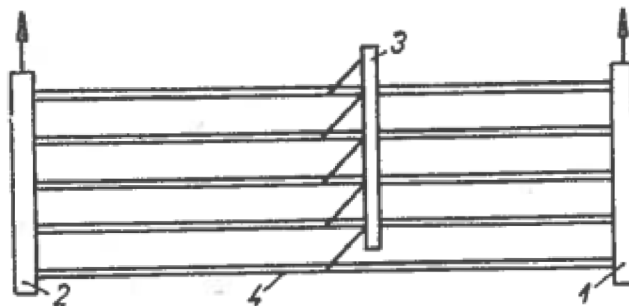
Obr. 24 - Rozdělovací čerpadlo [6]

3.4.5 Had s odstupňovaným průměrem

Příčinou vzniku sedla v charakteristice varnice je velký rozdíl mezi měrným objemem vody a páry před a za varnicí, respektive z nich vyplývající velký rozdíl mezi počátkem a koncem varnice. Tento rozdíl nejsnáze odstraníme odstupňovaným průměrem varnice. Tento způsob je zvláště výhodný pro průtočné kotle provozované s menšími tlaky [4].

3.4.6 Dýchací trubka

Dýchací trubka je připojena ke všem paralelně řazeným varnicím. Schéma je na obr. 25. Připojením dýchací trubky začne přetékat část směsi z trubky 1 do trubek 2 a 3 a poklesne tam tlak, neboť průtok na vstupu se zvětšil, a tím se vyrovnají průtočná množství do jednotlivých varnic. Dýchací trubka nezvětšuje proti směšovací komoře hydraulický odpor výparníku, a tím zůstává vlastní spotřeba kotle neměnná. Dýchací trubku se doporučuje připojit do výparníku tam, kde je už asi 10 – 15 % páry. Její průměr se většinou volí jako dvojnásobek průměru varnice [5].

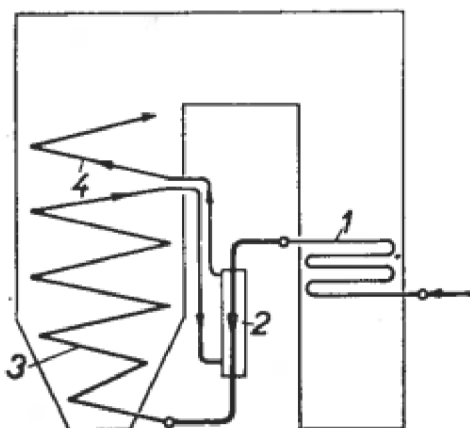


Obr. 25 - Dýchací trubka [3]

1 a 2 – komory výparníku, 3 – dýchací trubka, 4 – varnice

3.4.7 Předehřívání vody před výparníkem

Pro stabilizaci je výhodné, aby voda vstupující do výparníku byla blízko mezi sytosti. Ekonomizér umístěný v tazích kotle nemůže dodávat při všech výkonech vodu ohřátou na mez sytosti, jelikož při snížení výkonu kotle se snižuje i výkon ekonomizéru (dána konvekční charakteristikou). Dále pak u kondenzačního bloku klesá s výkonností teplota za vysokotlakým ohřivačem vody a tudíž má voda již na vstupu do ekonomizéru nižší teplotu. Odpařovací ekonomizér by sice při nižších výkonech dodával páru na mezi sytosti, při plném výkonu by však dodával již mokrou páru, což je z hlediska hydrodynamiky výparníku nevýhodné. Proto lze provést předehřívání vody mokrou párou z výparníku ve zvláštním předřazeném výměníku. Schéma je na obr. 26. Topným prostředím v tomto ohříváku je část syté mokré páry, vystupující z výparníku kotle. Protože tato pára má vzhledem k tlakovým ztrátám ve výparníku nižší tlak než ohřívána voda, nemůže uvést vodu ve výměníku do varu. Tím bude zaručeno, že voda vstupující do výparníku bude bez páry, která by ztěžovala její rovnoměrné rozdělení do paralelních hadů výparníku.



Obr. 26 - Stabilizační parní ohřívák vody uvnitř kotle [6]

1 – ekonomizér, 2 – stabilizační ohřívák, 3 – výparník (dohřívací část), 4 – výparník (odpařovací část)

4. HYDRAULICKÝ VÝPOČET VÝPARNÍKU KOTLE K2 ELEKTRÁRNY CHVALETICE

4.1 Popis kotle

Kotel K2 v elektrárně Chvaletice je řešen jako průtlačný, dvoutahový, s granulačním ohništěm a přímým foukáním uhlého prášku do hořákových sekcí, s přehříváky a přihříváky páry. K přípravě prášku je symetricky instalováno šest ventilátorových mlýnů s práškovými hořáky zaústěnými ve zkosených rozích a bočních stěnách spalovací komory kotle. Zapálení uhlí a stabilizace spalovacího procesu se provádí olejovými hořáky, ve kterých je spalován těžký topný olej. Jmenovitý parní výkon tohoto kotle je $650 \text{ [t}\cdot\text{h}^{-1}]$

Tlakový celek kotle je tvořen:

- Ekonomizérem umístěným na konci druhého tahu kotle.
- Šroubovitě vinutým výparníkem.
- Čtyřdílným přehřívákem tvořeným stěnovým přehřívákem v prostoru šotů, mezitahu a zadního tahu, dále šotovými přehřívákovými deskami a výstupním hadovým souproutým přehřívákem. Výstupní teplota páry je regulována třístupňovým vstřikem napájecí vody.

4.2 Výpočet tlakové ztráty výparníku

Výparník kotle K2 se skládá ze 128 šroubovitě vinutých trubek tvořící membránovou stěnu ohniště. Průměr těchto trubek je odstupňovaný. Na začátku výparníku je vnitřní průměr $d_1 = 30 \text{ mm}$, poté se průměr zvětšuje na $d_2 = 32 \text{ mm}$. Tři stěny výparníku jsou složeny z vodorovně vedených varnic, čtvrtá (zadní) stěna je pak složena z šikmých varnic (schéma výparníku na obr. 28).

Detailní výpočet hydrodynamiky výparníku je značně složitý, proto byla uvažována následující zjednodušení:

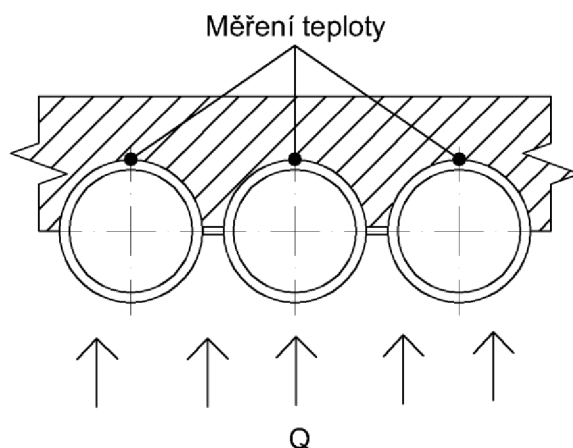
- Uvažujeme tlakovou ztrátu pouze třením a místními odpory.
- Příkon tepla do všech varnic je stejný a je konstantní i po délce varnice.
- Jelikož se délka jednotlivých úseku (ekonomizérový, směšovací, přehřívací) ve výparníku s výkonem mění, je obtížné určit, v kterém úseku došlo k rozšíření průměru varnice. Zjednodušíme tedy situaci tak, že ekonomizérový a směšovací úsek mají vždy vnitřní průměr trubky $d_1 = 30 \text{ mm}$. Přehřívací úsek má průměr $d_2 = 32 \text{ mm}$.

Pro výpočet je nutné znát parametry vody ve vstupní komoře výparníku, ty jsou uvedeny v tab. 1:

Tab. 1 - Parametry napájecí vody

Tlak	p_1	16,8	MPa
Teplota	t_1	330	°C
Entalpie	i_1	1513,5	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Hustota	ρ_1	656,26	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$
Měrný objem	v_1	0,001523	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$

Dále měříme teplotu trubek na výstupu z výparníku. Jak je vidět na obr. 27, čidla jsou umístěna na vnější straně trubky z neosálané strany, uvažuje se tedy, jak uvádí i [11], že teplota trubky je rovna teplotě média uvnitř. Měření probíhalo s periodou 5 minut. Společně s teplotou se také sledoval parní výkon výparníku. Průměrné hodnoty naměřených teplot při různých parních výkonech jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 27 - Schéma měření teploty

Při výpočtu se postupovalo následovně:

1. Pro parní výkony, které odpovídaly 90 – 100 % jmenovitému výkonu kotle se určila průměrná hodnota výkonu:

$$\dot{M}_v = 643,29 \quad [\text{t}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (34)$$

2. Zprůměrovaly se také hodnoty pro každou trubku zvlášť a z těchto hodnot se určila střední teplota páry na výstupu z výparníku:

$$T_{stř} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_{128}}{128} = 367,17 \quad [^\circ\text{C}] \quad (35)$$

Následně musíme odhadnout tlakovou ztrátu ve výparníku, abychom dostali tlak na výstupu z výparníku p a mohli určit střední entalpii páry. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 3. Na konci výpočtu se odhad kontroluje, pokud se liší o víc jak 5 %, výpočet opakujeme [4]. V tab. 2 jsou uvedeny parametry mokré páry, pro dané podmínky.

Tab. 2 - Parametry mokré páry

Teplota	t'	350,94	°C
Tlak	p'	167,200	bar
Bod syté kapaliny			
Entalpie	i'	1678,6	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota	ρ'	570,87	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrný objem	v'	0,0017517168	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Bod syté páry			
Entalpie	i''	2557,2	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota	ρ''	115,95	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrný objem	v''	0,0086244757	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Výparné teplo vody	r	878,6	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Tab. 3 - Parametry páry na výstupu z výparníku

Průměrné parametry páry na výstupu z výparníku			
Tlak	p	152,5	bar
Teplota	$t_{stř}$	367,17	°C
Entalpie	$i_{stř}$	2801,58	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota	$\rho_{stř}$	77,69	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrný objem	$v_{stř}$	0,01287152	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

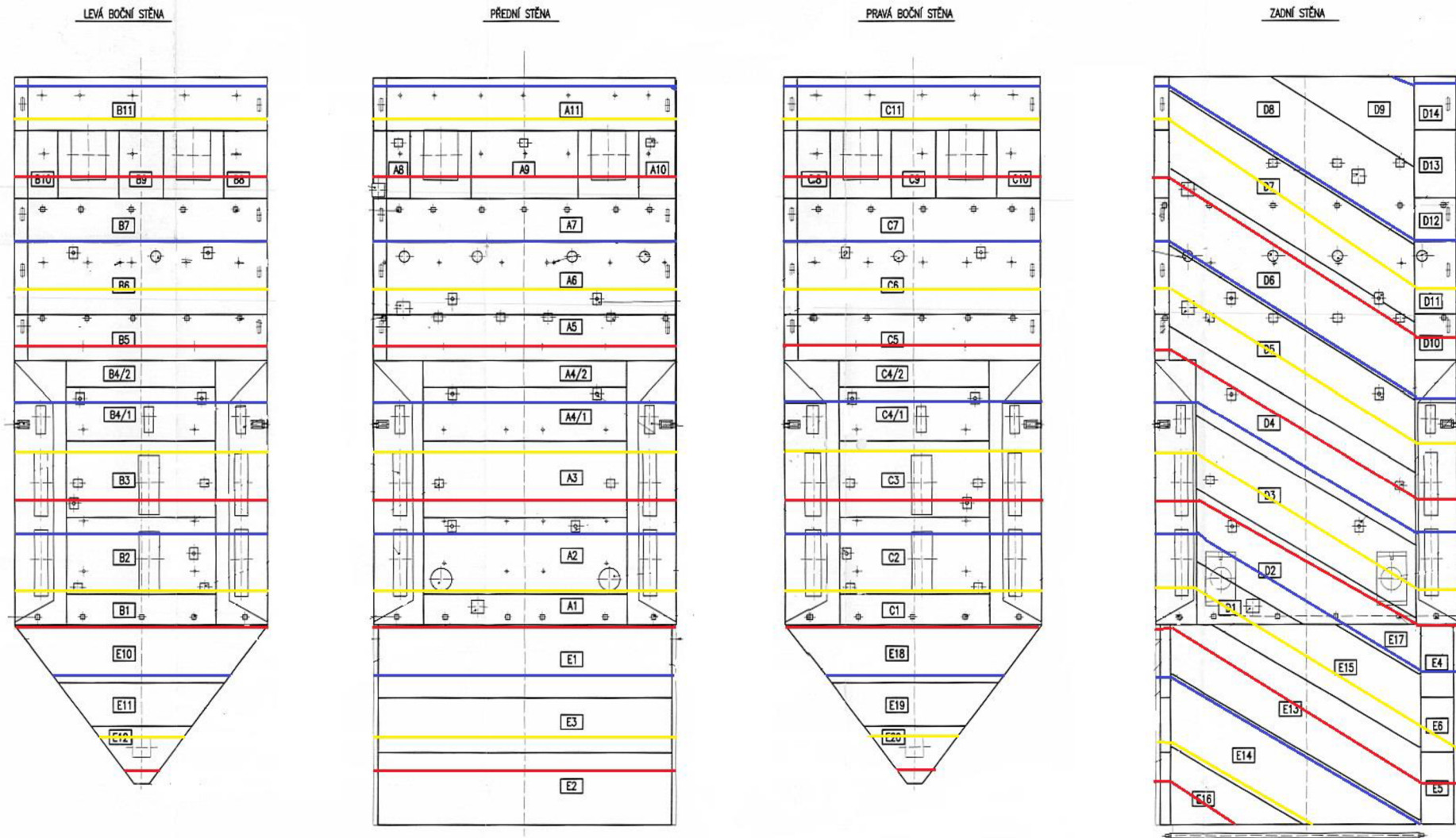
3. Z parního výkonu výparníku pak můžeme podle následujícího vzorce vypočítat průměrný parní výkon jedné trubky:

$$\dot{m}_{stř} = \frac{\dot{M}_v}{128 \cdot 3,6} = \frac{643,29}{128 \cdot 3,6} = 1,396 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (36)$$

Po dosazení do dalšího vztahu dostáváme tepelný příkon do varnic:

$$Q = \dot{m}_{stř} \cdot (i_{stř} - i_1) = 1,396 \cdot (2801,58 - 1513,5) = 1798,16 \quad [\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (37)$$

Časově je velmi náročné zjistit geometrii jednotlivých varnic z výrobních výkresů, proto byly pro výpočet v této práci uvažovány pouze varnice 3, 22 a 74. Tyto trubky byly zvoleny, protože při maximálním výkonu má varnice 3 na výstupu nejvyšší teplotu páry, varnice 74 nejnižší a varnice 22 má výstupní teplotu páry nejbližší průměrné hodnotě. Vzorový výpočet je uveden pro varnici č. 22. Výparník s naznačenými varnicemi je na obr. 28.



Obr. 28 – Rozvinutý řez výparníku kotle K2 s naznačenými varnicemi č. 3 (modrá), č. 22 (žlutá) a č. 74 (červená)

4.2.1 Výpočet tlakové ztráty varnice č. 22

Parametry trubky:

Délka $L = 235$ [m]

Součinitel místních odporů $\xi_m = 4,52$ [-]

Jak již bylo řečeno, uvažujeme tlakovou ztrátu pouze třením a místními odpory:

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_{tř} \quad [\text{Pa}] \quad (38)$$

Při výpočtu ztráty místními odpory nelze přesně určit, v které části výparníku se odpor nachází a dosazením součinitele do rovnice (23) by se nám rovnice značně zkomplikovala. Můžeme, jak uvádí [2], počítat tlakovou ztrátu místními odpory se středním měrným objemem v celé varnici. Kde střední měrný objem přehřívacího úseku byl odvozen v rovnici (21).

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= K \cdot \dot{m}^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot d_1^4} \cdot \left[\sum \xi_m \cdot \left\{ v_1 + \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{0,238}{100} \cdot \left(i_1 + \frac{Q}{\dot{m}} \right) - 4,58 \right] \right\} \right] = \\ &= 0,811 \cdot 1,396^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,03^2} \cdot \left[4,52 \cdot \left\{ 0,001524 + \frac{1}{153 \cdot 10^5} \cdot \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \left[\frac{0,238}{100} \cdot \left(1513,5 + \frac{1798,16}{1,396} \right) - 4,58 \right] \right\} \right] = \mathbf{120\ 385} \end{aligned} \quad [\text{Pa}] \quad (39)$$

Tlakovou ztrátu třením spočítáme podle rovnic odvozených v kapitole 3.2.

$$\Delta p_{tř} = \Delta p_{tř,w} + \Delta p_{tř,sm} + \Delta p_{tř,př} = \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^3 - B \cdot \dot{m}^2 + C \cdot Q \cdot \dot{m} \quad [\text{Pa}] \quad (40)$$

$$\begin{aligned} A &= K \cdot \left[\lambda_w \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v' + v_1}{2} \cdot (i' - i_1) + \lambda_{sm} \cdot \frac{L}{d_1^5} \cdot \frac{v'' + v'}{2} \cdot r + \right. \\ &\quad \left. + \lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_2^5} \cdot (i'' - i_1) \cdot \left(\frac{2,29 - 0,00119 \cdot i_1}{p} - \frac{1}{2} v'' \right) \right] = 0,811 \cdot \\ &\quad \cdot \left[0,021 \cdot \frac{235}{0,03^2} \cdot \frac{0,00175 + 0,001523}{2} \cdot (1678,6 - 1513,5) \cdot \right. \\ &\quad \cdot 0,016 \cdot \frac{235}{0,03^2} \cdot \frac{0,00862 + 0,00175}{2} \cdot 878,6 + 0,023 \cdot \frac{235}{0,03^2} \cdot \\ &\quad \left. \cdot (2557,2 - 1678,6) \cdot \left(\frac{2,29 - 0,00119 \cdot 1513,5}{153 \cdot 10^5} - \frac{1}{2} \cdot 0,00862 \right) \right] \\ &= \mathbf{462\ 514\ 464} \end{aligned} \quad \left[\frac{\text{kJ} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2} \right] \quad (41)$$

$$\begin{aligned} B &= K \cdot \left[\lambda_{př} \cdot \frac{L}{d_2^5} \cdot \left(\frac{2,29 + 0,00119 \cdot (i'' - 2 \cdot i_1)}{p} - \frac{1}{2} v'' \right) \right] = 0,811 \cdot \\ &\quad \cdot \left[0,023 \cdot \frac{235}{0,03^2} \cdot \left(\frac{2,29 + 0,00119 \cdot (2557,2 - 2 \cdot 1513,5)}{153 \cdot 10^5} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,0862 \right) \right] = \mathbf{970\ 375} \end{aligned} \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (42)$$

$$C = K \cdot \left[\lambda_{pr} \cdot \frac{L}{d_2^5} \cdot \left(\frac{0.00119}{p} \right) \right] = 0,811 \cdot \left[0,023 \cdot \frac{235}{0,032^2} \right] \cdot \left(\frac{0.00119}{153 \cdot 10^5} \right) = \mathbf{1\ 078} \quad \left[\frac{\text{s}^2}{\text{kJ} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (43)$$

$$\Delta p_{tr} = \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^3 - B \cdot \dot{m}^2 + C \cdot Q \cdot \dot{m} = \frac{462514464}{1798,16} \cdot 1,396^3 - 970375 \cdot 1,396^2 + 1078 \cdot 1,396 \cdot 1798,16 = \mathbf{1496477} \quad [\text{Pa}] \quad (44)$$

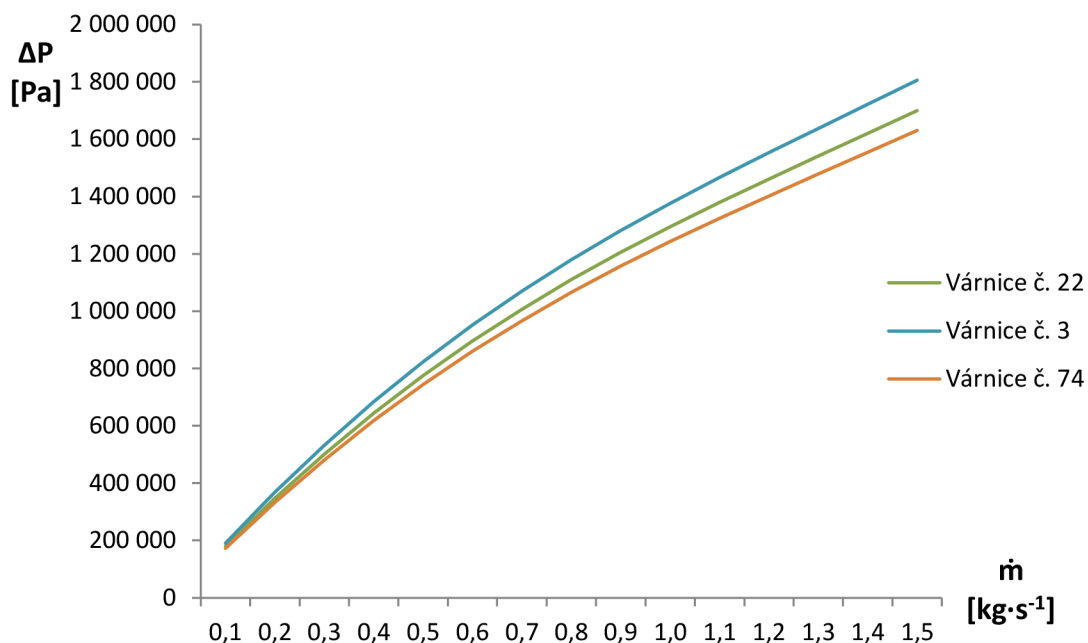
V následující tabulce vidíme hodnoty tlakových ztrát pro jednotlivé varnice.

Tab. 4 - Tlakové ztráty varnic 22, 3 a 74

Varnice č. 22			
Délka trubky	L	235	[m]
Součinitel místních odporů	ξ_m	4,52	[-]
Průtok	Tlaková ztráta místními odpory	Tlaková ztráta třením	Celková tlaková ztráta
\dot{m} [kg·s ⁻¹]	ΔP_m [Pa]	ΔP_{tr} [Pa]	ΔP [Pa]
0,1	11 384	168 137	179 521
0,2	22 461	323 976	346 437
0,3	33 188	467 795	500 983
0,4	43 526	600 074	643 601
0,5	53 444	721 479	774 923
0,6	62 912	832 841	895 753
0,7	71 906	935 135	1 007 042
0,8	80 410	1 029 458	1 109 868
0,9	88 408	1 117 004	1 205 412
1,0	95 890	1 199 045	1 294 935
1,1	102 852	1 276 907	1 379 759
1,2	109 291	1 351 955	1 461 246
1,3	115 208	1 425 569	1 540 778
1,4	120 689	1 499 367	1 620 056
1,5	125 495	1 574 034	1 699 529
Varnice č. 3			
Délka trubky	L	248	[m]
Součinitel místních odporů	ξ_m	5,23	[-]

Průtok	Tlaková ztráta místními odpory	Tlaková ztráta třením	Celková tlaková ztráta
\dot{m}	ΔP_m	$\Delta P_{tř}$	ΔP
$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	[Pa]	[Pa]	[Pa]
0,1	13 172	177 438	190 610
0,2	25 989	341 898	367 887
0,3	38 401	493 673	532 074
0,4	50 363	633 270	683 633
0,5	61 839	761 391	823 230
0,6	72 794	878 913	951 707
0,7	83 202	986 866	1 070 068
0,8	93 041	1 086 407	1 179 447
0,9	102 295	1 178 796	1 281 090
1,0	110 953	1 265 375	1 376 328
1,1	119 008	1 347 545	1 466 553
1,2	126 459	1 426 744	1 553 202
1,3	133 305	1 504 430	1 637 736
1,4	139 647	1 582 311	1 721 958
1,5	145 208	1 661 108	1 806 316
Varnice č. 74			
Délka trubky	L	227	[m]
Součinitel místních odporů	ξ_m	3,98	[-]
Průtok	Tlaková ztráta místními odpory	Tlaková ztráta třením	Celková tlaková ztráta
\dot{m}	ΔP_m	$\Delta P_{tř}$	ΔP
$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	[Pa]	[Pa]	[Pa]
0,1	10 024	162 413	172 437
0,2	19 777	312 947	332 724
0,3	29 223	451 870	481 093
0,4	38 326	579 646	617 973
0,5	47 059	696 918	743 977
0,6	55 396	804 489	859 885
0,7	63 316	903 301	966 617
0,8	70 803	994 412	1 065 216
0,9	77 846	1 078 978	1 156 824
1,0	84 434	1 158 226	1 242 661
1,1	90 564	1 233 438	1 324 003
1,2	96 234	1 305 931	1 402 165
1,3	101 445	1 377 039	1 478 484
1,4	106 271	1 448 325	1 554 595
1,5	110 502	1 520 449	1 630 952

Po vynesení hodnot do grafu dostáváme hydrodynamickou charakteristiku varnic:



Graf 1 - Hydrodynamická charakteristika varnic 3,22 a 74

4.3 Ověření aperiodické stability varnice

Ověřením aperiodické nestability (problém byl popsán kapitole 3.3) se zabývala spousta autorů. Výčet nejnámějších kritérií pro posouzení stability je uveden v [14]. Jednotlivá kritéria jsou stanovena podle konkrétních podmínek ve výparníku, jako jsou například:

- výstupní stav páry (mokrý x přehřátý pára)
- přísun tepla po délce varnice (konstantní x nerovnoměrný)
- geometrii varnice (horizontální x vertikální varnice)

Je tedy vždy třeba zvážit, jaké kritérium použijeme v závislosti na našich podmínkách.

Pro výpočet výparníku ve Chvaleticích byla zvolena dvě kritéria, která lze použít pro přehřátou páru vystupující z varnice a konstantní přísun tepla po délce varnice při uvažování pouze tlakové ztráty třením.

4.3.1 Schmidtovo kritérium ověření stability

V prvním kritériu se uvažuje vliv škrtecí clonky na vstupu do varnice (blíže je kritérium popsáno v [14]). Který můžeme popsat rovnicí:

$$\Delta p_{cl} = \frac{176 \cdot v_1}{d_{cl}^4} \cdot \dot{m}^2 = K_{cl} \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (45)$$

Po dosazení tohoto vztahu do rovnice charakteristiky varnice (23) dostáváme:

$$\Delta p_{tr} = \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^3 - B \cdot \dot{m}^2 + C \cdot Q \cdot \dot{m} + K_{cl} \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (46)$$

Po úpravě pak:

$$\Delta p_{tr} = \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^3 - (B - K_{cl}) \cdot \dot{m}^2 + C \cdot Q \cdot \dot{m} \quad [\text{Pa}] \quad (47)$$

Má-li být nová charakteristika stabilní, nesmí mít maximum ani minimum, smí mít pouze inflexní bod, pro který platí $y'' = 0$. Rovnici (46) tedy dvakrát derivujeme.

$$\frac{d(\Delta p)}{d\dot{m}} = 3 \cdot \frac{A}{Q} \cdot \dot{m}^2 - 2 \cdot (B - K_{cl}) \cdot \dot{m} \quad [-] \quad (48)$$

$$\left(\frac{d(\Delta p)}{d\dot{m}}\right)' = 6 \cdot \frac{A}{Q} \cdot \dot{m} - 2 \cdot (B - K_{cl}) \quad [-] \quad (49)$$

Podmínce $y'' = 0$ vyhovuje množství:

$$6 \cdot \frac{A}{Q} \cdot \dot{m} - 2 \cdot (B - K_{cl}) = 0 \quad [-] \quad (50)$$

Vyjádříme inflexní bod:

$$\dot{m}_{infl} = \frac{(B - K_{cl})}{3 \cdot \frac{A}{Q}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (51)$$

Dosadíme-li tuto hodnotu do první derivace obecného výrazu rovnice (48) a vyjádříme hodnotu \dot{m}_{12} , dostaneme:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} &= \frac{2 \cdot (B - K_{cl}) \pm \sqrt{4 \cdot (B - K_{cl})^2 - 12AC}}{6 \cdot \frac{A}{Q}} \\ &= \frac{(B - K_{cl}) \pm \sqrt{(B - K_{cl})^2 - 3AC}}{3 \cdot \frac{A}{Q}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (52) \end{aligned}$$

Za předpokladu:

$$\dot{m}_{infl} = \dot{m}_{12} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (53)$$

Musí být:

$$\pm \sqrt{(B - K_{cl})^2 - 3AC} = 0 \quad [-] \quad (54)$$

Rovnici upravíme a vyjádříme K_{cl}

$$(B - K_{cl})^2 \leq 3AC \quad \left[\frac{\text{s}^4}{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^4}\right] \quad (55)$$

$$K_{cl} \leq B - \sqrt{3AC} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}}\right] \quad (56)$$

Po dosazení za K_{cl} z (45):

$$\frac{176 \cdot v_1}{d_{cl}^4} = B - \sqrt{3AC} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (57)$$

Po úpravě:

$$d_{cl}^4 \leq \frac{176 \cdot v_1}{B - \sqrt{3AC}} \quad [\text{m}^4] \quad (58)$$

Vyjde-li d_{cl} větší než průměr varnice, není varnice aperiodickou nestabilitou ohrožena.

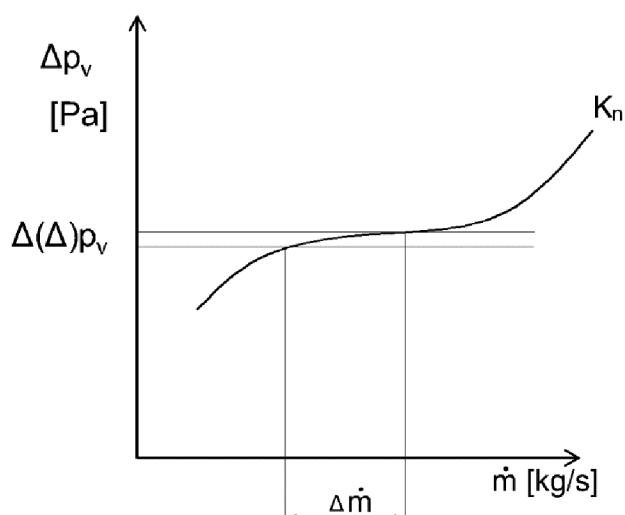
Po dosazení hodnot pro varnici č. 22 dostáváme:

$$d_{cl} \leq \sqrt[4]{\frac{176 \cdot v_1}{B - \sqrt{3AC}}} = \sqrt[4]{\frac{176 \cdot 0,001524}{970375 - \sqrt{3 \cdot 462514464 \cdot 1078}}} = 0,032 \quad [\text{m}] \quad (59)$$

Clonky se umísťují na počátek výparníku, kde je průměr varnic $d_1 = 0,03$ m. Vidíme tedy, že podle Schmidtova kritéria varnice č. 22 ohrožena není.

4.3.2 Schnackenbergovo kritérium ověření stability:

V předchozím kritériu je jako podmínka pro stabilitu varnic uvedeno, že charakteristika nesmí mít maximum ani minimum, musí mít tedy stále stoupající tendenci. Tento případ je ovšem extrémní, protože varnice může být ohrožena i pokud je charakteristika málo strmá. Problém je znázorněn na obr. 29, kde vidíme, že i velmi malý rozdíl v odporech trub, mohou způsobit značnou nerovnoměrnost průtoků, a tím dochází i k odlišným parametrům páry na výstupu z varnic [11].



Obr. 29 - Málo strmá charakteristika výparníku

Pro ověření stability varnic se tedy zavádí tzv. číslo stability Z . Toto číslo udává, o kolik procent se zvětší tlaková ztráta výparníku, změní-li se průtok vody výparníkem o 1 %.

$$Z = \frac{\dot{m}}{\Delta p} \cdot \frac{d\Delta p}{d\dot{m}} \quad [-] \quad (60)$$

Číslo stability nezávisí na rozměrech varnice a je funkcí pouze termodynamických veličin pracovní látky ve varnici. Ekonomizéry bez odpařování a přehříváky mají čísla stability blízká 2. Škrticí clonka, kterou proudí voda, má číslo stability prakticky rovné 2 [6].

V [11] je na základě provozních zkušeností minimální strmost stanovena z požadavku, aby poměrná změna průtoku nebyla více než třikrát větší, než je poměrná změna tlakové ztráty.

$$3 \cdot \frac{d\Delta p}{\Delta p} \geq \frac{d\dot{m}}{\dot{m}} \quad [-] \quad (61)$$

Tento vztah můžeme upravit:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{\dot{m}}{\Delta p} \cdot \frac{d\Delta p}{d\dot{m}} = Z \quad [-] \quad (62)$$

Znám-li dva body charakteristiky varnice, lze číslo stability stanovit takto:

$$Z = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\dot{m}_1 - \dot{m}_2} \cdot \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\Delta p_1 + \Delta p_2} \quad [-] \quad (63)$$

Pro varnici č. 22 můžeme tedy dosadit pro průtok 0,9 a 1,1 z tab. 4:

$$Z = \frac{1276907 - 1117004}{1,1 - 0,9} \cdot \frac{0,9 + 1,1}{1276907 + 1117004} = 0,668 \quad [-] \quad (64)$$

Vidíme, že je splněna podmínka uvedena v rovnici (62). Charakteristika je tedy dostatečně strmá a i druhé kritérium vylučuje vznik aperiodické nestability.

4.4 Stanovení clonkování k odstranění hydraulické nerovnoměrnosti

I přesto, že varnice netrpí aperiodickou nestabilitou, jak bylo popsáno v předchozí kapitole, panuje mezi nimi hydraulická nerovnoměrnost. Ta je způsobena rozdílnými odpory jednotlivých varnic. V praxi to znamená, že u dlouhých varnic s velkým počtem místních odporů teče menší množství pracovní látky a na výstupu z varnice má pára vyšší parametry než u varnic geometricky jednodušších. Stejně tak může rozdílný odpor varnic vzniknout při montáži, kdy dochází k provaření některých svarů, nebo usazením nečistot uvnitř varnice při jejím provozu.

Tyto podmínky tak přispívají k tomu, že jednotlivé trubky membránové stěny jsou rozdílně chlazeny a mají jinou teplotu. To vede ke vzniku mechanických napětí a poškození trubek. K zamezení vzniku těchto problémů se používají clonky. Mají za úkol splnit dva základní požadavky:

- Splnit, aby nebylo podkročeno minimální průtočné množství varnice \dot{m}_{\min} , tak aby varnici stále proudilo dostatečné množství pracovní látky nutné k jejímu chlazení.
- Docílit stejné entalpie pracovní látky na výstupu ze všech varnic.

Byl stanoven algoritmus pro navržení clonek do jednotlivých varnic. Tento algoritmus vychází ze základní podmínky, že tepelný tok je rovnoměrný po celé délce varnice a je pro každou varnici stejný. Výpočet byl proveden pro tři parní výkony kotle. Konkrétně pro parní výkon 343; 512 a 643 t·h⁻¹.

Krok č. 1

Stejně jako v kapitole 4.2 si určíme střední průtok vody kotlem:

$$\dot{m}_{stř} = \frac{\dot{M}_v}{128 \cdot 3,6} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (65)$$

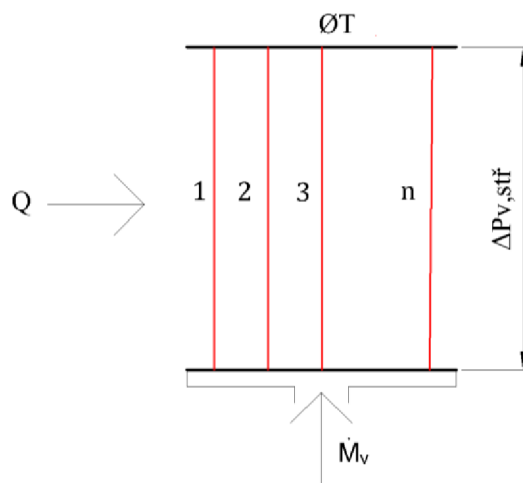
Pro průměrnou teplotu vystupující páry určíme entalpii a z ní dopočítám tepelný příkon výparníku:

$$Q = \dot{m}_{stř} \cdot (i_{stř} - i_1) \quad [\text{kW}] \quad (66)$$

Pro výpočet potřebuji znát celkový tlakový spád výparníku. Ten si zvolím podle tab. 4 pro průtok vypočítaný v rovnici (65) tzn., že volím tlakový spád ve výparníku podle středního průtoku pro varnici, která má výstupní teplotu nejbližší teplotě střední.

Výstup z kroku č. 1:

- Známe hodnotu příkonu tepla do všech varnic a tlakový spád výparníku. Situace je schématicky zakreslena na obr. 30.



Obr. 30 - Výstup z kroku č. 1

Krok č. 2

Ze známých naměřených teplot jednotlivých trubek zjistím entalpie páry na výstupu. Při známém příkonu si mohu dopočítat průtok konkrétními varnicemi:

$$\dot{m}_n = \frac{Q}{(i_n - i_1)} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (67)$$

Po dopočtení všech průtoků jednotlivými trubkami, můžeme vidět, že trubky s nejmenším průtokem mají nejvyšší teplotu vystupující páry. Při stejném tlakovém spádu a konstantnímu přívodu tepla do všech trubek, nastává tento jev, protože mají varnice rozdílnou délku a jiný počet místních odporů, zkráceně můžeme říct, že má každá trubka jiný odpor R_T .

Varnice, která má největší odpor, má nejmenší průtok a nejvyšší výstupní teplotu páry. V následujících rovnicích bude odvozen vzorec pro výpočet hydraulického odporu varnice.

Vyjdeme z rovnic pro výpočet tlakové ztráty místními odpory a třením:

$$\Delta p_m = \sum \xi_m \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{1}{v} \quad [\text{Pa}] \quad (68)$$

$$\Delta p_{tř} = \lambda \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{v} \quad [\text{Pa}] \quad (69)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\Delta p = \left(\frac{v}{2 \cdot S^2} \cdot \left(\sum \xi_m + \frac{\lambda \cdot L}{d} \right) \right) \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (70)$$

Výraz v závorce si označíme jako R_T (modifikovaný součinitel odporu varnic):

$$R_T = \left(\frac{v}{2 \cdot S^2} \cdot \left(\sum \xi_m + \frac{\lambda \cdot L}{d} \right) \right) \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (71)$$

$$\Delta p = R_T \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (72)$$

Za Δp dosadíme tlakový spád ve výparníku:

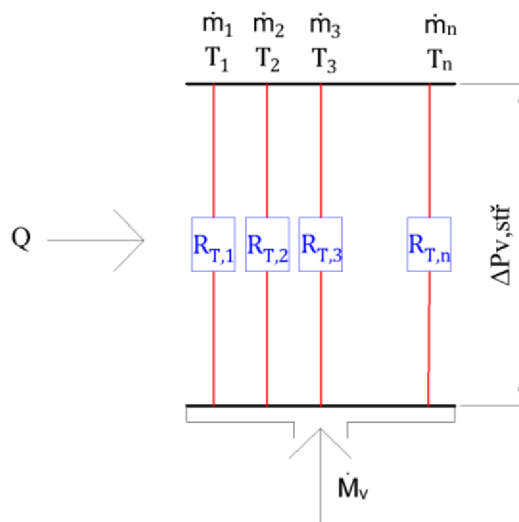
$$\Delta P_{v,stř} = R_T \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (73)$$

Z rovnice vyjádříme R_T a tlakový spád vydělíme průtokem trubky, který známe z rovnice (67), a dostaneme odpor každé trubky:

$$R_{T,n} = \frac{\Delta P_{v,stř}}{\dot{m}_n^2} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (74)$$

Výstup z kroku č. 2:

- Znám parametry páry na výstupu z každé trubky a odpor každé z varnic ve výparníku. Schématicky je situace na obr. 31.



Obr. 31 - Výstup z kroku č. 2

Krok č. 3

Z kroku č. 2 jsou známy odpory všech varnic ve výparníku. Najdeme varnici s nejvyšším odporem $R_{T,max}$. Touto varnicí proudí nejmenší množství pracovní látky, která má na výstupu nejvyšší teplotu. Aby došlo k vyrovnání hydraulické nerovnoměrnosti, musí mít všechny varnice stejný odpor. K vyrovnání odporů všech varnic využijeme clon.

$$R_{T,max} = R_{T,n} + R_{cl} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (75)$$

Vyjádříme odpor clony:

$$R_{cl,n} = R_{T,max} - R_{T,n} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (76)$$

Vzorec pro tlakovou ztrátu clony je [3]:

$$\Delta p_{cl} = \left(\frac{8 \cdot v_1}{d_{cl}^4 \cdot \alpha^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \pi^2} \right) \cdot \dot{m}^2 = R_{cl} \cdot \dot{m}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (77)$$

α [-] – součinitel průtoku $\alpha = f(d_{cl}/d)$, volím podle [8] $\alpha = 0,6$.

ε [-] – součinitel expanze $\varepsilon = f(\Delta p_{cl}/p_1)$, pro kapaliny s teplotou nižší než je teplota varu $\varepsilon \approx 1$ [6].

Při vyrovnání hydraulické nerovnoměrnosti teče všemi varnicemi stejné množství média, které známe z rovnice (65), při známém odporu clonky určím její tlakovou ztrátu:

$$\Delta p_{cl,n} = R_{cl,n} \cdot \dot{m}_{stř}^2 \quad [\text{Pa}] \quad (78)$$

Ze vzorce (77) vyjádříme průměr clony pro odstranění hydraulické nerovnoměrnosti:

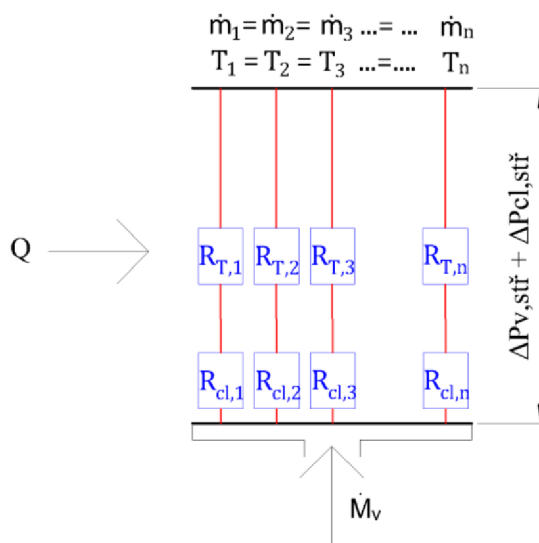
$$d_{cl,n} = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot v_1 \cdot \dot{m}_{stř}^2}{\Delta p_{cl,n} \cdot \alpha^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \pi^2}} \quad [\text{m}] \quad (79)$$

Pokud vyjde d_{cl} větší než průměr varnice, zůstane varnice bez clon. Celková tlaková ztráta výparníku je určena:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v,stř} + \Delta P_{cl,stř} \quad [\text{Pa}] \quad (80)$$

Výstup z kroku č. 3:

- Znáám potřebnou tlakovou ztrátu clonky k odstranění hydraulické nerovnoměrnosti výparníku pro konkrétní výkon. Schéma je znázorněno na obr. 32.



Obr. 32- Výstup z kroku č. 3

Ukázka výpočtu pro varnici č. 22 pro parní výkon 643 t·h⁻¹:

$$\dot{m}_{stř} = \frac{\dot{M}_v}{128 \cdot 3,6} = \frac{643,3}{128 \cdot 3,6} = 1,396 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (81)$$

$$Q = \dot{m}_{stř} \cdot (i_{stř} - i_1) = 1,396 \cdot (2801,58 - 1513,5) = 1798,16 \quad [\text{kW}] \quad (82)$$

$$\dot{m}_{21} = \frac{Q}{(i - i_1)} = \frac{1798,16}{(2795,9 - 1513,5)} = 1,408 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (83)$$

$$R_{T,21} = \frac{\Delta P_{v,stř}}{\dot{m}_{21}^2} = \frac{1616983}{1,408^2} = 815544 \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (84)$$

Maximální teplotu má varnice č. 3 a její součinitel odporu je:

$$R_{T,max} = 912724 \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (85)$$

$$R_{cl,22} = R_{T,max} - R_{T,21} = 912724 - 829952 = 97180 \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (86)$$

$$\Delta p_{cl,22} = R_{cl,22} \cdot \dot{m}_{stř}^2 = 97180 \cdot 1,396^2 = 189395 \quad [\text{Pa}] \quad (87)$$

$$d_{cl,22} = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot v_1 \cdot \dot{m}_{stř}^2}{\Delta p_{cl,22} \cdot \alpha^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \pi^2}} = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot 0,00152 \cdot 1,396^2}{162016 \cdot 0,6^2 \cdot 1^2 \cdot \pi^2}} = 0,0143 \quad [\text{m}] \quad (88)$$

Potřebné průměry clon k odstranění hydraulické nerovnosti pro jednotlivé parní výkony jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5 - Vypočtené průměry clonek pro odstranění hydraulické nerovnoměrnosti pro různé parní výkony kotle

Parní výkon [t·h ⁻¹]	344	512	643	Parní výkon [t·h ⁻¹]	344	512	643
Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]			Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]		
1	9,9	15,0	18,1	65	7,8	10,4	12,7
2	10,4	19,0	23,3	66	7,7	10,5	12,9
3	10,5	bez clony	bez clony	67	7,7	10,6	12,9
4	9,6	19,8	22,5	68	7,8	10,5	12,8
5	9,9	23,8	29,5	69	7,7	10,7	13,1
6	9,7	16,7	20,8	70	8,4	10,8	13,2
7	9,1	14,1	18,3	71	7,7	10,7	12,9
8	8,9	15,7	20,7	72	7,8	10,3	12,3
9	8,8	15,6	19,4	73	7,7	10,4	12,5
10	7,7	12,4	15,0	74	7,8	10,2	12,2
11	7,7	12,4	15,6	75	7,7	10,6	12,6
12	8,6	13,2	17,6	76	7,7	10,4	12,4
13	8,6	13,0	16,5	77	7,7	10,4	12,5
14	10,3	16,6	19,4	78	7,7	10,5	12,6
15	11,1	16,7	17,2	79	8,4	10,8	13,0
16	11,7	15,6	16,2	80	7,7	10,8	13,1
17	11,9	16,1	15,7	81	7,7	10,9	13,2
18	10,7	15,5	15,4	82	7,8	10,7	12,9
19	9,6	12,8	14,9	83	7,8	10,7	12,8
20	8,9	11,7	13,7	84	7,7	10,9	13,0
21	9,5	13,1	15,0	85	8,5	11,2	13,7
22	9,2	12,4	14,3	86	8,6	11,2	13,6
23	8,9	11,6	13,5	87	8,8	11,4	13,8
24	9,2	12,0	14,3	88	9,2	12,1	15,1
25	9,4	12,6	15,2	89	8,8	11,5	14,0
26	9,6	13,3	16,4	90	8,7	11,5	14,2
27	9,0	12,1	14,8	91	7,7	10,7	13,2
28	9,0	12,5	16,1	92	7,8	10,4	12,5
29	8,8	12,0	15,3	93	8,9	11,5	14,1
30	9,4	13,1	17,3	94	8,6	10,9	13,1
31	8,7	12,0	15,5	95	8,9	11,5	14,1
32	8,5	11,7	15,6	96	8,8	11,2	13,7
33	8,4	11,2	14,8	97	8,6	10,9	13,2
34	8,5	11,4	15,7	98	7,7	10,5	12,8
35	8,5	11,2	15,6	99	7,8	10,3	12,4
36	8,5	11,3	15,7	100	7,8	10,2	12,4
37	7,7	11,0	14,9	101	7,7	10,4	12,8
38	7,8	10,5	13,8	102	7,8	10,1	12,3
39	7,8	10,7	14,4	103	7,8	10,4	12,7
40	7,7	10,9	15,1	104	7,8	10,1	12,3

41	7,8	10,6	14,1		105	7,7	10,4	12,8
42	7,8	10,7	14,5		106	7,7	10,4	12,8
43	7,8	10,7	14,3		107	7,7	10,5	12,9
44	8,5	11,4	16,5		108	7,7	10,3	12,6
45	7,8	10,6	13,9		109	8,7	10,7	12,8
46	7,7	11,2	15,3		110	9,2	11,2	13,6
47	7,8	11,3	15,4		111	8,7	10,9	13,6
48	8,4	11,9	17,9		112	8,4	10,5	13,0
49	8,5	11,8	17,1		113	9,4	11,0	13,6
50	8,9	13,3	26,5		114	17,3	15,1	21,2
						bez		
51	8,7	12,8	20,0		115	clony	16,7	27,1
52	8,5	11,2	15,2		116	9,7	11,7	14,2
53	8,6	11,3	15,3		117	11,8	16,3	21,5
54	7,7	10,8	14,1		118	12,3	20,1	28,7
						bez		
55	7,7	11,0	14,6		119	11,5	20,0	clony
56	7,7	10,6	13,7		120	9,7	14,6	17,8
57	7,8	10,5	13,5		121	9,2	14,1	16,9
58	7,7	10,5	13,7		122	9,8	17,8	24,7
59	8,4	10,6	13,3		123	7,8	11,6	14,0
60	7,8	10,3	12,8		124	7,8	10,8	13,1
61	7,7	10,5	13,0		125	7,8	11,2	13,5
62	8,4	10,8	13,4		126	7,8	11,2	13,3
63	7,7	10,7	13,4		127	7,9	10,5	12,5
64	7,7	10,7	13,3		128	7,8	10,4	12,6

Krok č. 4

V tab. 5 vidíme, že s rostoucím parním výkonem nám vzrůstá i průměr clonky nutný k odstranění hydraulické nerovnoměrnosti. Kdyby bylo zvoleno malých průměrů clon pro velké parní výkony, dojde sice k vyrovnání hydraulické nerovnoměrnosti, ale zvýší se nám tlaková ztráta výparníku. V tomto kroku bude tedy spočítáno, jak se mění tlaková ztráta výparníku v závislosti na průměru clonky.

Z rovnice (77) vyjádříme odpor clonky s novým průměrem:

$$R'_{cl,n} = \left(\frac{8 \cdot v_1}{d_{cl}^4 \cdot \alpha^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \pi^2} \right) \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (89)$$

Tento odpor přičteme k odporu rovnice získaném v rovnici (74) a dostáváme modifikovaný součinitel odporu trubky s novou clonkou.

$$R'_{T,n} = R_{T,n} + R'_{cl,n} \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (90)$$

Pokud budeme uvažovat, že k rozvrstvení směsi dochází pouze na základě odporu jednotlivých varnic a neuvažujeme tlakovou ztrátu v rozdělovací komoře, můžeme průtok každou varnicí spočítat podle uzlového pravidla pro paralelní řazení, kde platí:

$$\dot{M}_v = \sum \dot{m}'_1 + \dot{m}'_2 + \dots + \dot{m}'_n \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (91)$$

Celkový odpor výparníku je:

$$R'_v = \left(\frac{1}{\sqrt{R'_{T,1}}} + \frac{1}{\sqrt{R'_{T,2}}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R'_{T,n}}} \right)^{-2} \quad \left[\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \quad (92)$$

Průtok každou varnicí je pak:

$$\dot{m}'_n = \frac{R'_v}{\sqrt{R'_{T,n}}} \cdot \dot{M}_v \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (93)$$

Při známém průtoku už stačí vyjádřit jen novou entalpii na výstupu z varnice:

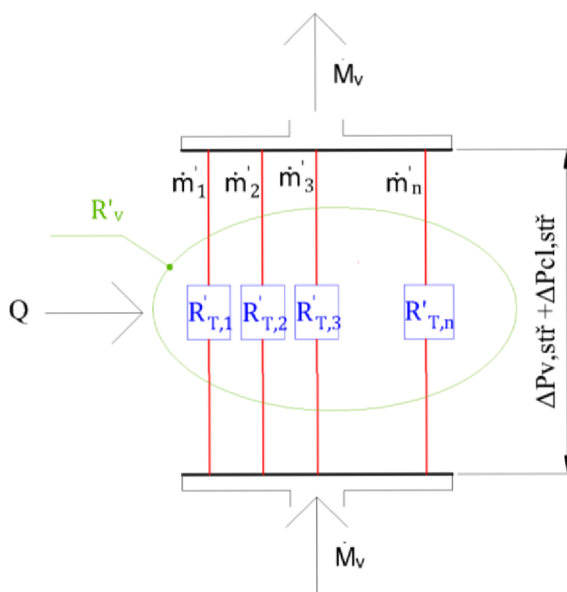
$$i'_n = \frac{Q}{\dot{m}'_n} + i_1 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (94)$$

Celková tlaková ztráta výparníku je určena:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v,stř} + \Delta P_{cl,stř} \quad [\text{Pa}] \quad (95)$$

Výstup z kroku č. 4:

- Na základě námi zvoleného průměru clon dostáváme hodnoty jejich tlakových ztrát, průtoky média varnicí a novou teplotu na výstupu z výparníku. Situace je zobrazena na obr. 33.



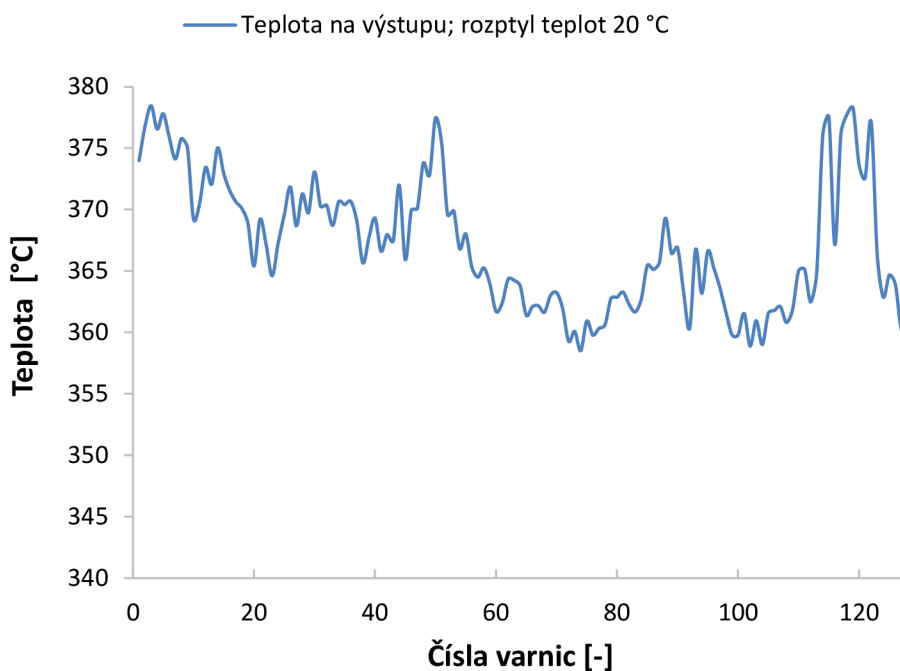
Obr. 33- Výstup z kroku č. 4

4.5 Optimalizování průměru clonek

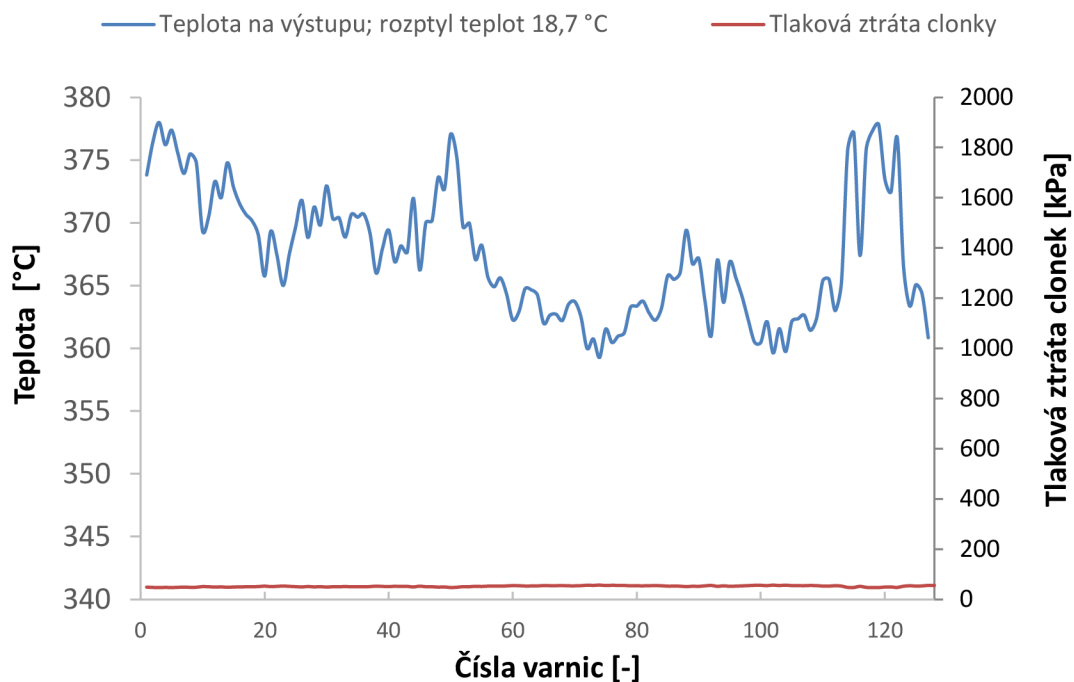
Celý algoritmus byl implementován do programu Microsoft Excel, což nám optimalizaci správného průměru značně usnadní.

4.5.1 Stejně clonky na vstupu do výparníku

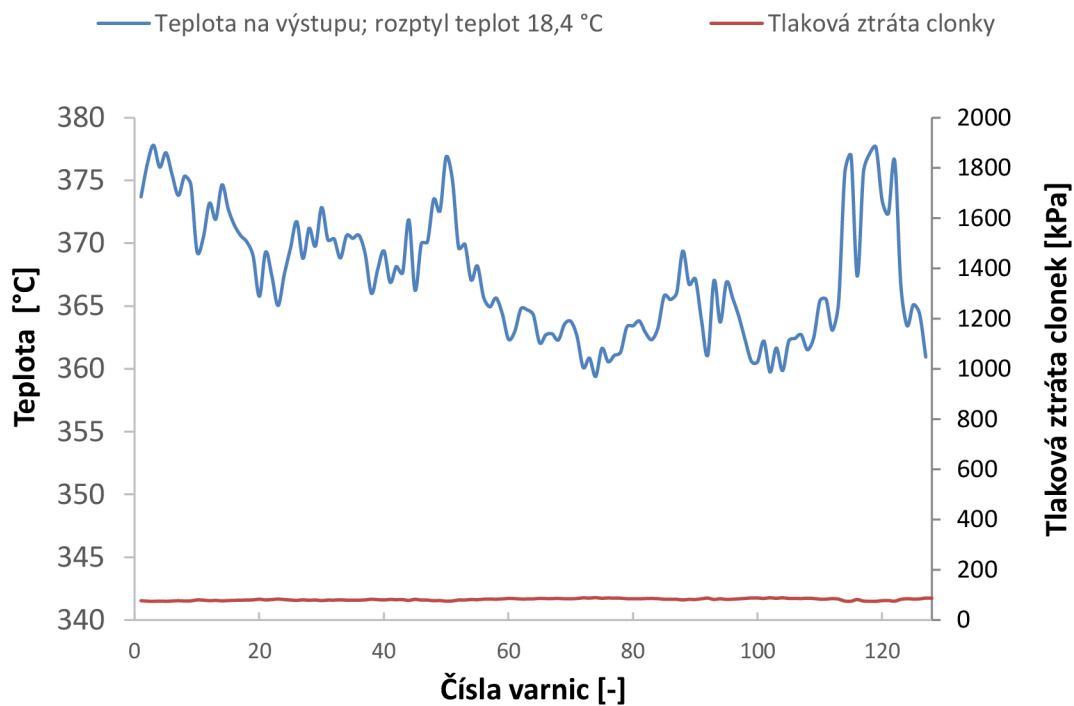
Optimalizace spočívá v nalezení vhodného kompromisu mezi průměrem clonky, její tlakovou ztrátou a rozptylem teplot na výstupu z varnic. V následujících grafech vidíme, jak se se zmenšujícím průměrem clonek snižuje rozptyl teplot na výstupu z varnic a jak vzrůstá tlaková ztráta clony. Všechny grafy jsou pro parní výkon $643 \text{ [t} \cdot \text{h}^{-1}\text{]}$.



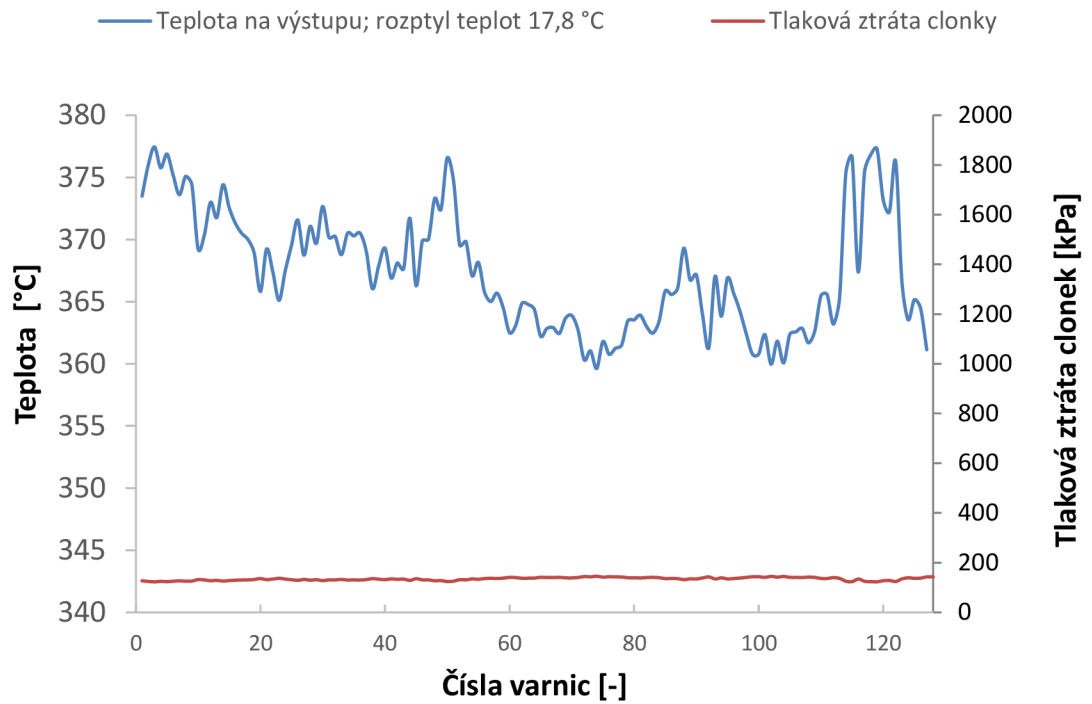
Graf 2 - Rozptyl teplot pro původní stav bez clon



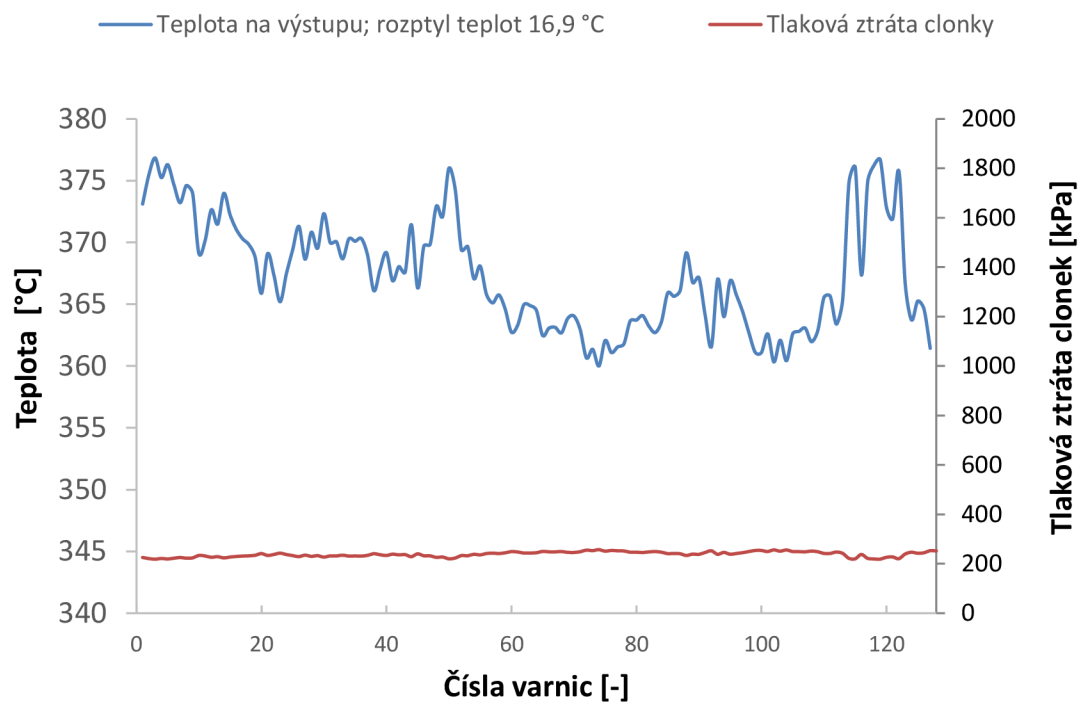
Graf 3 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 19$ [mm]



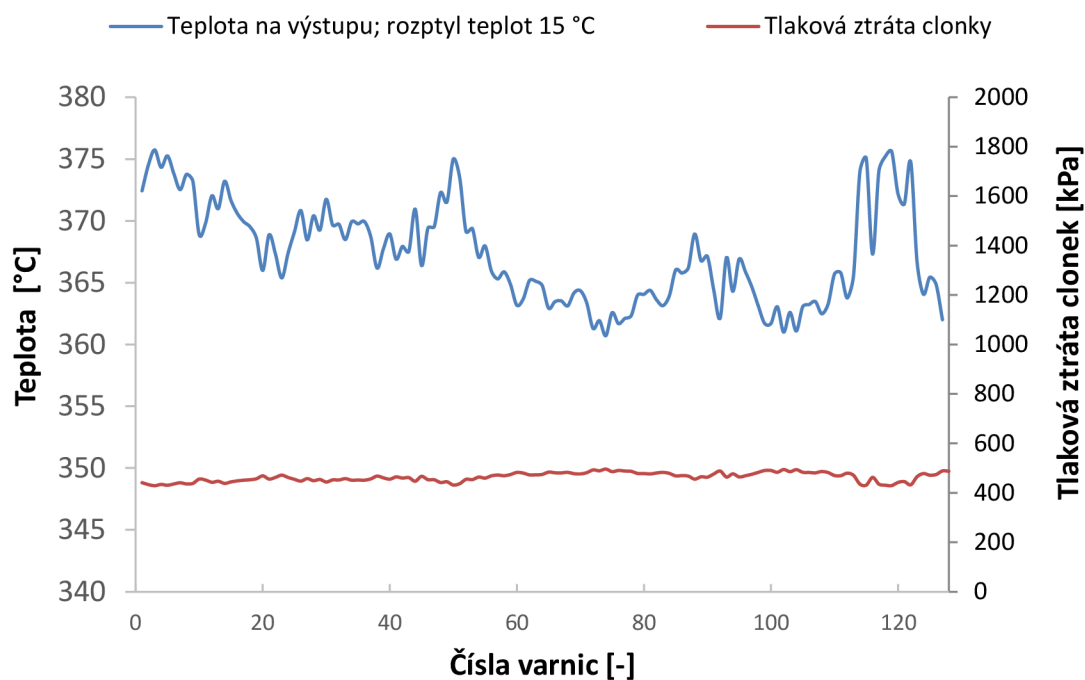
Graf 4 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 17$ [mm]



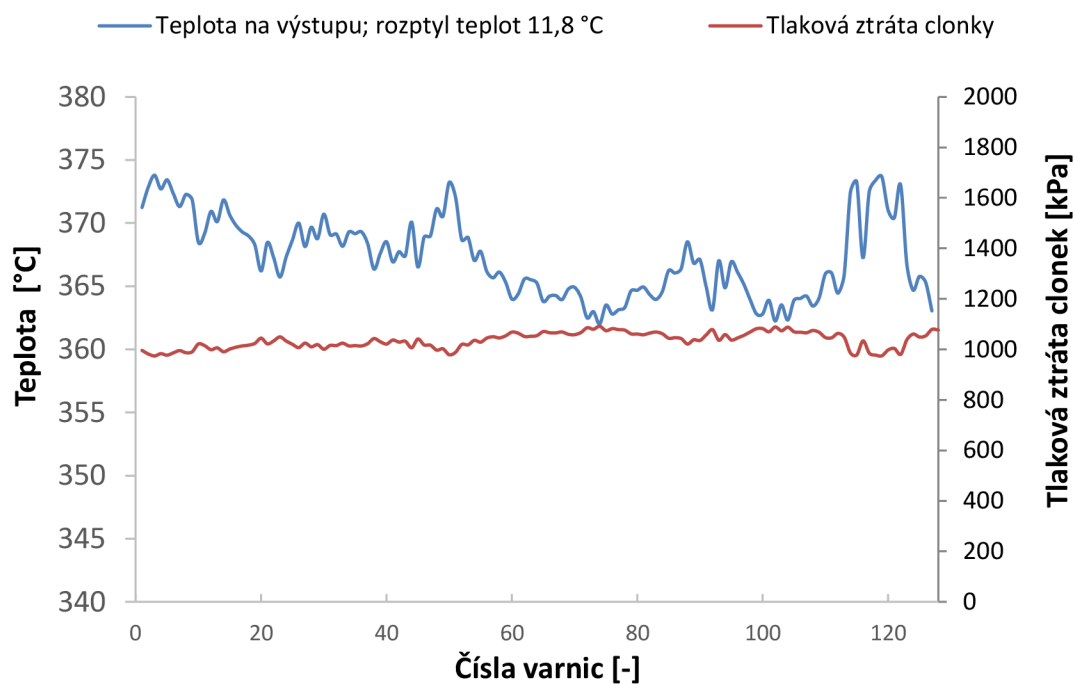
Graf 5 Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 15$ [mm]



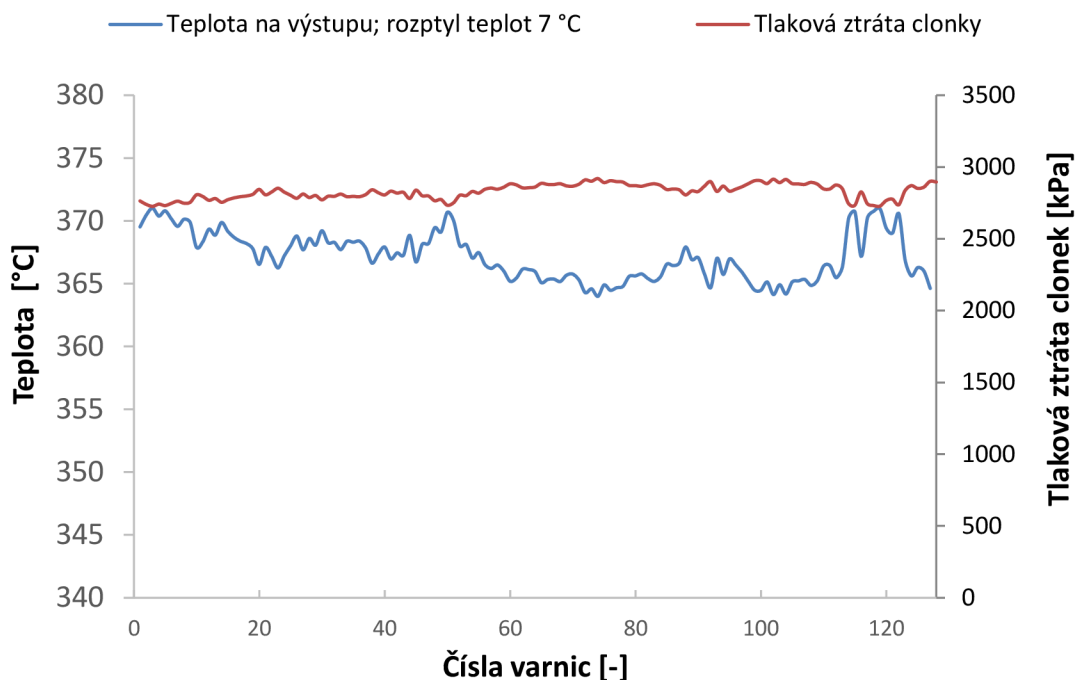
Graf 6 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 13$ [mm]



Graf 7 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 11$ [mm]

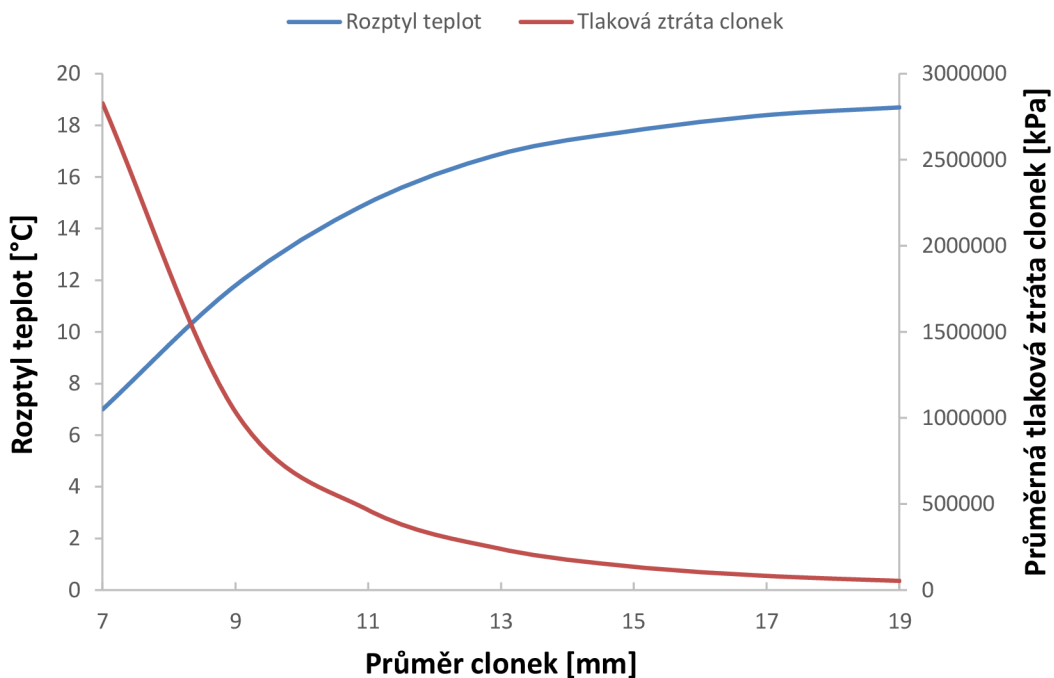


Graf 8 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 9$ [mm]



Graf 9 - Rozptyl teplot a tlaková ztráta pro clonky $d = 7$ [mm]

Graf 9 ukazuje, že rozptyl teplot je pouze 7 °C , tlaková ztráta clonek však dosahuje hodnot kolem $2,8\text{ MPa}$, což je z hlediska ekonomiky bloku nepřijatelné. V následujícím grafu je souhrnný graf závislosti rozptylu teplot a tlakové ztráty na průměru clony.



Graf 10 - Závislost mezi rozptylem teplot, průměrem clonky a její tlakovou ztrátou

4.5.2 Odstupňované clonkování

V předcházející kapitole bylo uvažováno, že do všech varnic jsou zabudované clonky stejného průměru. Elegantnější řešení, kterým se dosáhne snížením rozptylu teplot i tlakové ztráty clonek je tzv. odstupňované clonkování. To spočívá v tom, že se do varnic vevaří clonky různých průměrů, tak aby došlo k vyrovnání teplot na výstupu z výparníku.

Při optimalizaci průměru clonek budeme vycházet z podmínek:

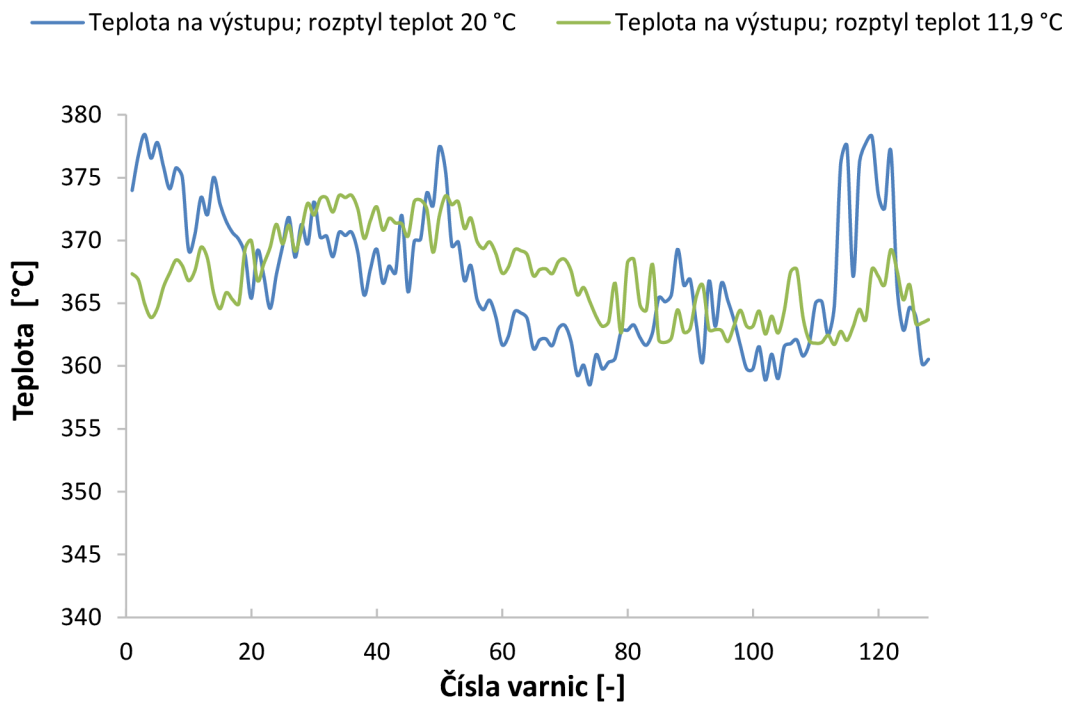
- Průměr clonky by neměl být, jak uvádí [2], menší než 7 mm. Tato podmínka je dána zejména z provozních důvodů, neboť při menším průměru clony může dojít k jejímu ucpání.
- Rozdíl teploty mezi nejchladnější a nejteplejší trůbkou na výstupu z výparníku by neměl překročit 15 °C. Rozdíl teplot mezi sousedními trůbkami by neměl být větší než 5 °C.
- Tlaková ztráta clonky by neměla přesáhnout 40 % tlakové ztráty výparníku.

Dvě poslední podmínky vycházejí z dat uvedených v [11] a jsou pouze orientační. Vždy záleží především na posouzení provozovatele kotle, jaký zvolí kompromis mezi tlakovou ztrátou a rozptylem teplot na výstupu. Zvolené průměry clon jsou v následující tabulce.

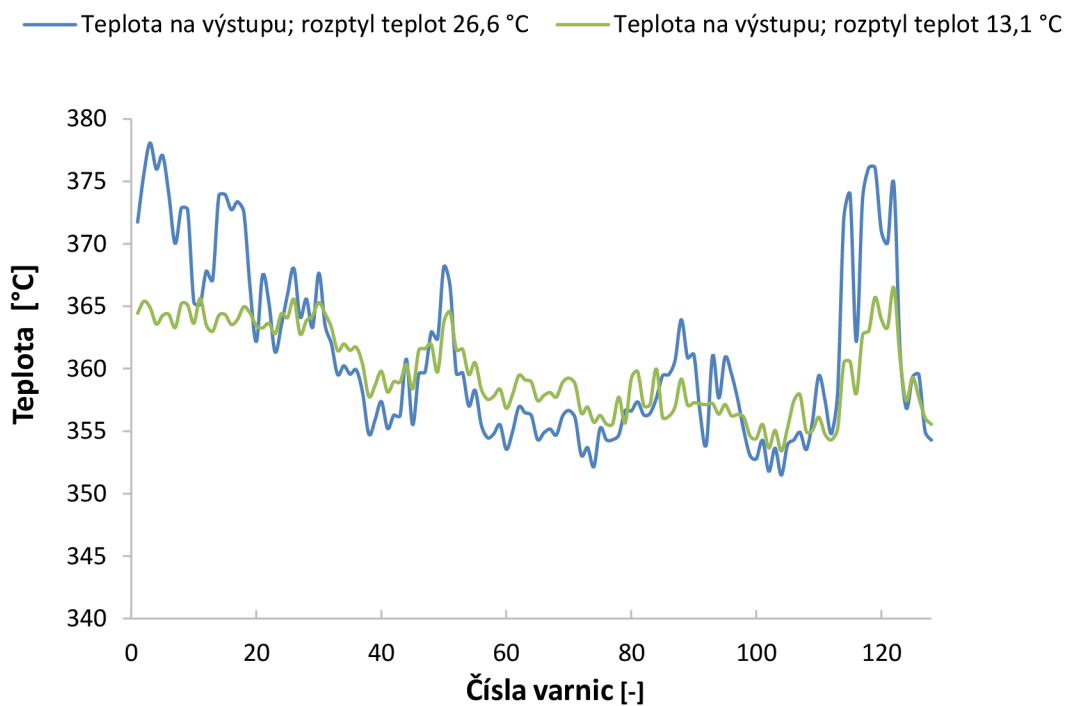
Tab. 6 – Zvolené průměry clon

Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]	Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]	Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]	Číslo varnice [-]	Průměr clony [mm]
1	10	33	9,4	65	9,4	97	9,8
2	10,2	34	9,4	66	9,4	98	9,6
3	10,5	35	9,4	67	9,4	99	9,6
4	10,5	36	9,4	68	9,4	100	9,6
5	10,5	37	9,4	69	9,4	101	9,6
6	10,2	38	9,4	70	9,4	102	9,6
7	10	39	9,4	71	9,4	103	9,6
8	10	40	9,4	72	9,4	104	9,6
9	10	41	9,4	73	9,4	105	9,6
10	9,8	42	9,4	74	9	106	9,4
11	9,8	43	9,4	75	9,6	107	9,4
12	9,8	44	9,6	76	9,6	108	9,6
13	9,8	45	9,4	77	9,6	109	9,8
14	10,2	46	9,4	78	9,4	110	10
15	10,2	47	9,4	79	9,8	111	10
16	10	48	9,6	80	9,4	112	9,8
17	10	49	9,8	81	9,4	113	10
18	10	50	9,8	82	9,6	114	10,6
19	9,6	51	9,6	83	9,6	115	10,8
20	9,4	52	9,4	84	9,4	116	10
21	9,8	53	9,4	85	10	117	10,4
22	9,6	54	9,4	86	10	118	10,6
23	9,4	55	9,4	87	10	119	10,2
24	9,4	56	9,4	88	10	120	10
25	9,6	57	9,4	89	10	121	10
26	9,6	58	9,4	90	10	122	10
27	9,6	59	9,4	91	9,6	123	9,6
28	9,6	60	9,4	92	9,4	124	9,6
29	9,4	61	9,4	93	10	125	9,6
30	9,6	62	9,4	94	9,8	126	9,8
31	9,4	63	9,4	95	10	127	9,6
32	9,4	64	9,4	96	10	128	9,6

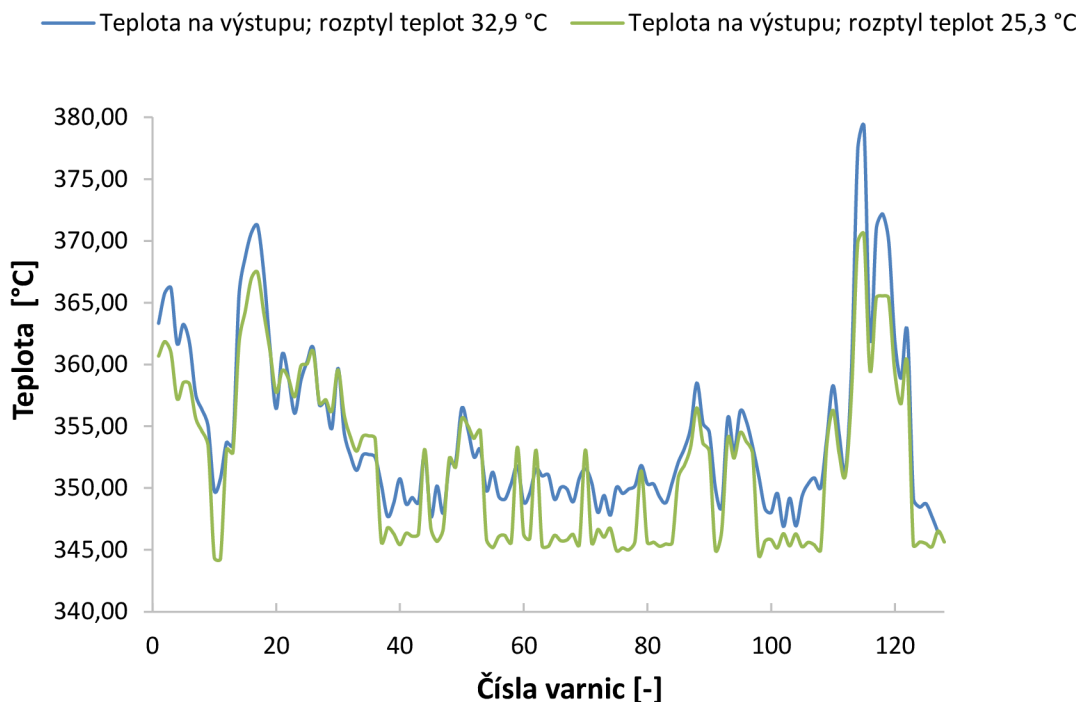
Na následujících grafech vidíme situaci před aplikováním clonek (modrá křivka) a po aplikaci (zelená křivka) pro uvažované parní výkony.



*Graf 11 - Rozptyl teplot před a po clonkování pro parní výkon 643 [t·h⁻¹];
průměrná tlaková ztráta clonek 777 [kPa]*



*Graf 12 - Rozptyl teplot před a po clonkování pro parní výkon 512 [t·h⁻¹];
průměrná tlaková ztráta clonek 494 [kPa]*



Graf 13 - Rozptyl teplot před a po clonkování pro parní výkon 343 [$t \cdot h^{-1}$];
průměrná tlaková ztráta clonek 223 [kPa]

Graf 11 a graf 12 ukazují, že došlo k dodržení všech podmínek daných na začátku této kapitoly. Graf 13 však poukazuje na to, že při nejmenším parním výkonu nedojde k dodržení podmínky o maximálním rozptylu teplot ve výparníku, ani mezi sousedními trubkami. Na tomto grafu je vidět, že malý rozptyl teplot je jen mezi trubkami, ze kterých vycházela při počátečním stavu mokrá pára a mezi trubkami s párou přehřátou. To je způsobeno zejména nepřesností výpočtového algoritmu pro případ, kdy z varnic vystupuje mokrá pára a není znám stupeň jejího nasycení.

V grafu 13 vidíme, že některé varnice (např. 114 – 119) vykazují výrazně vyšší hodnoty teploty na výstupu než zbytek varnic. U těchto varnic je potřeba pátrat po příčinách vyššího ohřevu oproti ostatním varnicím a snažit se ho odstranit. Jestliže by nebyla tato příčina zjištěna nebo její odstranění nebylo možné, je řešením do těchto varnic aplikovat škrťací ventily popsané v kapitole 3.4.3. Vzhledem k malému počtu problémových varnic, by toto řešení bylo ekonomicky snesitelné.

Dalším z možných způsobů řešení je aplikace dynamických clonek popsaných v kapitole 3.4.2. Při správném seřízení by tyto clonky měnily svůj odpor v závislosti na průtoku výparníkem, a tím by se dalo dosáhnout odstranění hydraulické nerovnoměrnosti i malé tlakové ztráty výparníku.

5. ZÁVĚR

Průtočné kotle jsou provozovány zejména pro krytí základního zatížení přenosové soustavy. V minulosti kotle obvykle pracovaly na 80 – 100 % svého jmenovitého výkonu. V posledních letech se však díky instalování velkého množství obnovitelných zdrojů zvýšily nároky na velikost regulačního rozsahu. To současně zvyšuje nároky na jednotlivé komponenty kotle.

V práci byly popsány problémy, které vznikají při proudění vody výparníkem průtočného kotle. Jedná se zejména o vznik aperiodické nestability výparníku a vznik hydraulické nerovnoměrnosti mezi jednotlivými varnicemi. Tyto problémy způsobují rozdílnou teplotu páry na výstupu z výparníku a mohou vést k nevratnému poškození jednotlivých varnic. Dále byly zmíněny parametry, jež přispívají ke vzniku hydraulických nestabilit.

Výpočet byl proveden pro výparník kotle K2 v elektrárně Chvaletice. Jmenovitý výkon tohoto kotle je 650 [t·h⁻¹]. U tohoto výparníku bylo na základě Schmidtova a Schnackenbergova kritéria ověřeno, že aperiodická nestabilita u toho výparníku nevzniká. To je zapříčiněno zejména vysokým tlakem vody na výstupu z ekonomizéru a malým rozdílem teplot mezi vodou na vstupu do výparníku a stavem syté kapaliny.

Dále byl sestaven algoritmus pro odstranění hydraulické nerovnoměrnosti pomocí instalování statických clon umístěných na počátek výparníku. Výpočet byl proveden pro parní výkony odpovídající přibližně 50%, 75% a 100% jmenovitému výkonu. Pro výkony, kdy všechny varnice produkují páru přehřátou, došlo po aplikaci clonek ke snížení rozptylu teplot ve výparníku na požadovaných 15 °C při zachování přijatelné tlakové ztráty jednotlivých clon. Ukázalo se, že zvolený algoritmus není vhodný pro stav, kdy některé varnice měly před aplikací clonek na výstupu parametry v oblasti mokré páry.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRKIĆ, Dejan. Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [online]. 2011, 77(1), 34-48 [cit. 2016-03-11]. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.02.006. ISSN 09204105. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092041051100043X>
- [2] BUDAJOVÁ, Elvíra. *Problémy stability proudění ve výparnicích průtlačných kotlů*. Brno: b. t., 1968.
- [3] ČERNÝ, Václav, Jiří TEYSSLER a Břetislav JANEBA. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1983.
- [4] ČERNÝ, Václav. *Parní kotle a spalovací zařízení: vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975. Řada strojírenské literatury.
- [5] DOLEŽAL, Richard. *Dampferzeugung: Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger*. Berlin: Springer-Verlag, 1990. ISBN 35-401-3771-8.
- [6] DOLEŽAL, Richard. *Průtočné kotle*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960
- [7] *Elekárna Chvaletice* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.chvaletice.cz/assets/Image.ashx?id_org=16569&id_obrazky=2960&datum=31.1.2011+16%3A48%3A02
- [8] IDEL'CHIK, I a M STEINBERG. *Handbook of hydraulic resistance: coefficients of local resistance and of friction*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c1994. ISBN 08-493-9908-4.
- [9] KAKAÇ, S. *Boilers, evaporators, and condensers*. New York: Wiley, c1991. ISBN 04-716-2170-6.
- [10] KITTO, J a S STULTZ. *Steam: its generation and use*. 41st ed. New York: Babcock & Wilcox, 2005. ISBN 0-9634570-1-2.
- [11] MATEV, Milen. *Úprava hydraulické nerovnoměrnosti a zajištění stability proudění ve výparnicích kotlů s nuceným průtokem pomocí clon*. Brno: VUT FSI, 1974.
- [12] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers for power and process*. Boca Raton: CRC Press, c2009. ISBN 14-200-7536-5.
- [13] VILIMEC, Ladislav. *Zařízení k nastavení požadovaného stabilizovaného průtoku vody ve varnici průtočného kotle za jeho provozu*. Česká republika. 137878 Patentový spis. Přihlášeno 25.11 1965. Uděleno 15. 08. 1970.
- [14] VILIMEC, Ladislav. *Zařízení k regulaci průtočného množství vody na vstupu do trubky kotle s nuceným oběhem*. Česká republika. 124311 Patentový spis. Přihlášeno 25.11 1965. Uděleno 15.03 1967.
- [15] VLADIMÍR, Zeman. *Parní kotle*. 2. Brno: VUT Brno, 1972.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
$\Delta p, \Delta P$	Tlaková ztráta	Pa
A, A'	Součinitel při výpočtu tlakové ztráty	$\text{kJ} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$
B, B'	Součinitel při výpočtu tlakové ztráty	$\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
C, C'	Součinitel při výpočtu tlakové ztráty	$\text{s}^2 \cdot \text{kJ}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
d	Průměr	m
g	Tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	Výška	m
i	Měrná entalpie	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
K	Konstanta	-
L	Délka	m
\dot{m}, \dot{M}	Hmotnostní tok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Q	Tepelný tok	kW
r	Poloměr	m
r	Výparné teplo	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
R	Odporový součinitel def. vztahem (71)	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
S	Průřez	m^2
T	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
v	Měrný objem	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
w	Rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
x	Suchost páry	-
Z	Číslo stability	-
α	Součinitel průtoku	-
ε	Součinitel expanze	-
ξ	Součinite místní tlakové ztráty	-
ϕ	Úhel ohybu	$^{\circ}$
λ	Součinitel tření	-
ρ	Měrná hmotnost	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Indexy

index	význam
cl	clonka
infl	inflexní
kr	kritická
m	místní odpory
př	přehřátá
sm	směs
st	statický

stř	střední
T	trubka, varnice
tř	tření
v	výparník
w	voda
zr	zrychlení

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Zprůměrované teploty varnic pro různé parní výkony.

Příloha 1a – Zprůměrované teploty varnic pro parní výkon 643 [t·h⁻¹]

Číslo varnice [-]	Teplota médiá [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota médiá [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota médiá [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota médiá [°C]
1	374	33	369	65	361	97	364
2	377	34	371	66	362	98	362
3	378	35	370	67	362	99	360
4	377	36	371	68	362	100	360
5	378	37	369	69	363	101	362
6	376	38	366	70	363	102	359
7	374	39	368	71	362	103	361
8	376	40	369	72	359	104	359
9	375	41	367	73	360	105	362
10	369	42	368	74	358	106	362
11	370	43	367	75	361	107	362
12	373	44	372	76	360	108	361
13	372	45	366	77	360	109	362
14	375	46	370	78	361	110	365
15	373	47	370	79	363	111	365
16	372	48	374	80	363	112	362
17	371	49	373	81	363	113	365
18	370	50	377	82	362	114	376
19	369	51	375	83	362	115	378
20	365	52	370	84	363	116	367
21	369	53	370	85	365	117	376
22	367	54	367	86	365	118	378
23	365	55	368	87	366	119	378
24	367	56	365	88	369	120	374
25	370	57	364	89	366	121	373
26	372	58	365	90	367	122	377
27	369	59	364	91	363	123	366
28	371	60	362	92	360	124	363
29	370	61	362	93	367	125	365
30	373	62	364	94	363	126	364
31	370	63	364	95	367	127	360
32	370	64	364	96	365	128	361

Příloha 1b – Zprůměrované teploty varnic pro parní výkon 512 [t·h⁻¹]

Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]
1	372	33	360	65	354	97	358
2	376	34	360	66	355	98	355
3	378	35	360	67	355	99	353
4	376	36	360	68	355	100	353
5	377	37	358	69	356	101	354
6	374	38	355	70	357	102	352
7	370	39	356	71	356	103	354
8	373	40	357	72	353	104	351
9	373	41	355	73	354	105	354
10	365	42	356	74	352	106	354
11	365	43	356	75	355	107	355
12	368	44	361	76	354	108	354
13	367	45	356	77	354	109	356
14	374	46	360	78	355	110	359
15	374	47	360	79	357	111	357
16	373	48	363	80	357	112	355
17	373	49	362	81	357	113	358
18	373	50	368	82	356	114	372
19	366	51	367	83	356	115	374
20	362	52	360	84	358	116	362
21	367	53	360	85	359	117	374
22	365	54	357	86	360	118	376
23	361	55	358	87	361	119	376
24	363	56	356	88	364	120	371
25	366	57	354	89	361	121	370
26	368	58	355	90	361	122	375
27	364	59	356	91	356	123	361
28	366	60	354	92	354	124	357
29	363	61	355	93	361	125	359
30	368	62	357	94	358	126	360
31	363	63	356	95	361	127	355
32	362	64	356	96	360	128	354

Příloha 1c – Zprůměrované teploty varnice pro parní výkon 343 [t·h⁻¹]

Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]	Číslo varnice [-]	Teplota média [°C]
1	363	33	351	65	349	97	353
2	366	34	353	66	350	98	351
3	366	35	353	67	350	99	348
4	362	36	352	68	349	100	348
5	363	37	350	69	351	101	350
6	362	38	348	70	352	102	347
7	358	39	349	71	350	103	349
8	356	40	351	72	348	104	347
9	355	41	349	73	349	105	349
10	350	42	349	74	348	106	350
11	351	43	349	75	350	107	351
12	354	44	353	76	350	108	350
13	353	45	348	77	350	109	354
14	366	46	350	78	350	110	358
15	369	47	348	79	352	111	354
16	371	48	352	80	350	112	351
17	371	49	352	81	350	113	360
18	367	50	356	82	349	114	377
19	361	51	355	83	349	115	379
20	356	52	353	84	350	116	362
21	361	53	353	85	352	117	371
22	359	54	350	86	353	118	372
23	356	55	351	87	355	119	370
24	359	56	349	88	359	120	362
25	360	57	349	89	355	121	359
26	361	58	350	90	355	122	363
27	357	59	352	91	350	123	349
28	357	60	349	92	348	124	348
29	355	61	350	93	356	125	349
30	360	62	352	94	353	126	348
31	355	63	351	95	356	127	346
32	353	64	351	96	355	128	348