

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Vliv inertního plynu na provoz sušící části

Effect of inert gas for the operation of the drying section

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní technika

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Hoffman CSc.

Bc. Jan Šimral

Praha 2016

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Ústav: 12118

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Jan ŠIMRAL**

program N2301 Strojní inženýrství

obor 3909T012 Procesní technika

název česky: **Vliv inertních plynů na výkon sušící části papírenského stroje**

název anglicky: **Effect of inert gases to the performance of the drying section of the paper machine**

Zásady pro vypracování

Zadání:

- Popis problému při najíždění stroje - vliv zavzdušnění topných válců (popis sušící části).
- Teoretická část - kondenzace páry (blánová/kapičková), přestup tepla a vliv vzduchu na přestup tepla, tepelná a vlhkostní bilance.
- Praktická část - náběh stroje (odvod vzduchu z válců, přívod páry do válců, vliv parovzdušné směsi) a provoz (prodyšnost sušícího síta, odvod odpařené vlhkosti větráním zákrytu, obrazy proudění pod zákrytem, větrání kapes).
- Analýza - vliv vzduchu ve válcích na tepelnou a vlhkostní bilanci papíru, vliv vzduchu ve válcích na spotřebu energií (topná pára a elektrická energie).
- Optimalizace náběhu sušící části s ohledem na odsátí vzduchu ze sušících válců.

Rozsah grafických prací: dle potřeby.

Rozsah průvodní zprávy: dle bodů v zadání práce.


Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše.

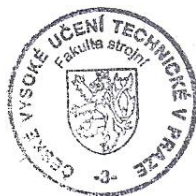
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Hoffman, CSc.

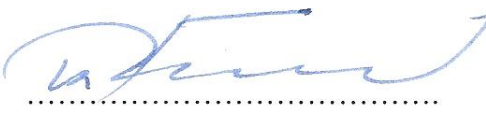
Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 30. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 15. ledna 2016


.....
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



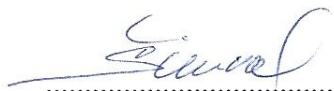

.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 29. října 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne: 30. 10. 2015


.....
Bc. Jan Šimral

Anotační list

Jméno autora: Jan

Příjmení autora: Šimral

Název práce česky: Vliv inertního plynu na provoz sušící části

Název práce anglicky: Effect of inert gas for the operation of the drying section

Rozsah práce: počet stran: 73
počet obrázků: 24
počet tabulek: 12
počet příloh: 2

Akademický rok: 2015/2016

Jazyk práce: český

Ústav: 12118 - Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Strojní inženýrství

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Hoffman CSc.

Oponent: Ing. Milan Kadlec

Konzultant práce: Ing. Martin Neužil Ph.D.

Zadavatel:

Anotace česky: Cílem práce je dokázat negativní vliv vzduchu přítomného v sušícím válci při sušení papírového pásu. Poukázat na možnost, jak vzduch ze systému odstranit.

Anotace anglicky: This work demonstrates the negative impact of air present in the drying cylinder for drying the paper web. It shows possibility, how to displace the air from drying cylinders.

Klíčová slova: papír, sušící část, clupak, součinitel přenosu tepla, tepelná vodivost, pára,

Využití: Řešení odvodu odvodu parokondenzátní soustavy.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Z důvodu použití důvěrných informací týkajících se provozu papírenského stroje ve Štětí odpírám udělit souhlas s užitím tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
Bc. Jan Šimral

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce panu Doc. Ing. Pavlu Hoffmanovi CSc. za rady a připomínky, kterými mne během vypracování této práce směřoval k jejímu zdárnému dokončení. Dále děkuji panu Ing. Martinu Neužilovi Ph.D. za jeho podporu a spolupráci během měření a zpracování naměřených dat. Jmenovitě děkuji kolegům Stanislavu Imiálkovi, Romanu Zajacovi a Petru Schölovi za jejich asistenci při měření. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině, která mne při studiu podporovala.

.....
Bc. Jan Šimral

Abstrakt

Vliv inertního plynu na provoz sušící části

Tato práce se zabývá problematikou přestupu tepla při výrobě pytlového papíru. Čtenář se v úvodu práce seznámí s procesy potřebnými k výrobě buničiny a jejímu následnému zpracování na finální produkt, pytlový papír. Následuje teoretická část týkající se přenosu tepla při kondenzaci páry a vliv vzduchu na přenos tepla. V dalších kapitolách je popsána sušící část a clupaková jednotka, jež byla předmětem zkoumání. V závěru jsou vyhodnocena naměřená data a poskytnuta doporučení dalšího postupu po prokázání úspěchu pilotního projektu u jednotky clupak.

Abstract

Effect of inert gas for the operation of the drying section

This thesis deals with the issue of heat transfer in the production of sack paper. The reader is in the introduction acquainted with the processes necessary for the production of pulp and its subsequent processing to the final product, sack paper. There follows the theoretical part concerning the transfer of heat during the condensation of steam and influence of air during heat transfer. In subsequent chapters describes the drying part and clupak unit, which was under investigation. In the end, I evaluate the measured data and made recommendations to further action after proving the success of the pilot project at the unit clupak.

Obsah

1	Papír	3
2	Výroba papíru ve Štětí	4
3	Pytlový papír	5
3.1	Fáze výroby pytlového papíru	5
3.2	Získání a úprava vlákna	6
4	Papírenský stroj	7
4.1	Sítová část	7
4.2	Lisová část	7
4.3	Sušicí část	8
4.4	Konečná úprava	9
5	Sušení papíru na papírenském stroji	10
5.1	Sušicí kryt PS5	10
5.2	Sušicí síto	10
5.3	Ventilace sušícího krytu	12
5.4	Sušicí válec	12
5.5	Paro-kondenzátní systém	14
5.6	Odstavení a najetí parní skupiny	15
6	Vliv vzduchu na sušení papíru	16
7	Odvod kondenzátu a jeho vliv na sušení	17
8	Fáze sušení papíru	18
9	Kondenzace par a přenos tepla	19
9.1	Stacionární vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou	20
9.2	Stacionární vedení tepla složenou válcovou stěnou	21
9.3	Vedení tepla stěnou sušícího válce	22
9.4	Odpory při přenosu tepla ze sušícího válce	23
10	Sušicí část papírenského stroje č. 5	25

10.1	Rozměry sušících válců	26
10.2	Topné médium sušící části PS5	26
11	Teoretický výpočet teploty povrchu clupakového válce	29
11.1	Povrchová teplota při přenosu tepla stěnou válce	29
11.2	Povrchová teplota válce při přenosu tepla stěnou válce a vrstvou kondenzátu	31
11.3	Povrchová teplota válce při přenosu tepla stěnou válce, vrstvou kondenzátu a vrstvou vzduchu	34
12	Pilotní projekt odvzdušnění clupakového válce PS5	40
12.1	Ejektor	42
12.2	Postup měření povrchové teploty clupakového válce	43
12.3	Měřicí přístroj ALMEMO 2490-1L	45
12.4	Výsledky měření a jejich zpracování	45
12.5	Rozbor dat získaných při měření	49
12.6	Výpočet teoretického tlaku páry potřebného k dosažení žádané povrchové teploty	51
13	Diskuze, doporučení a závěr řešeného tématu	55
13.1	Pilotní projekt	55
13.2	Doporučení dalšího postupu	56
13.3	Najetí jednotky clupak po jejím odstavení	57
13.4	Závěr	57
14	Použité zdroje	59
15	Seznam použitých zkratk a znaků	61
16	Seznam obrázků	62
17	Seznam tabulek	63
18	Seznam grafů	64
19	Přílohy	65

1 Papír

Papír je jednou z nejdůležitějších komodit využívaných člověkem již od starověku. Vynález tohoto důležitého produktu je datován do roku 105 našeho letopočtu, na dvoře čínského císaře Han Ho Ti, kdy jej k uložení potřebných dat a informací poprvé vyrobil a použil císařský úředník Tsai Lun.

Výroba této komodity prošla během uplynulých dvou tisíciletí velkou proměnou. Zatímco do 8. století byla výroba tohoto produktu přísně střežena, stejně jako mnoho jiných čínských vynálezů, po čínsko-arabských válkách došlo k šíření umění výroby papíru přes Asii dále do Evropy. První „papírna“ na Evropském kontinentu byla založena ve 12. století ve Španělsku a výroba papíru se rozšiřovala dále napříč celou Evropou.

Přelomovými lety pro výrobu tohoto produktu se staly roky 1670 a 1799. V prvním zmiňovaném letopočtu došlo v Holandsku k výrobě zařízení zvaného holandr, jenž slouží k výrobě papírové hmoty, a tudíž bylo možno mnohonásobně navýšit produkci papíru. Na konci 18. století Francouz Louis Robert sestrojil první stroj s dlouhým nekonečným sítem, na nějž byla papírovina rovnoměrně nanášena a během jeho pohybu odvodňována. Dalším průlomem byla v 19. století stavba sušící části a papírenský stroj se tak začíná podobat současným moderním strojům.

Z původní ruční výroby, kdy vznikaly jednotlivé archy papíru různé kvality a parametrů, dospěl proces výroby této komodity do sofistikovaných provozů, jež jsou schopny denně chrlit i více než tisíc tun tohoto produktu s minimálními odchylkami sledovaných kvalitativních parametrů.

Přes veškerý technický rozvoj a výrobu nejrůznějších typů médií sloužících k ukládání dat zůstává papír nedílnou součástí života každého z nás. Nejen, že jej používáme pro zaznamenání dat, ale slouží člověku ve všech životních situacích, ať již jako hygienická pomůcka, tak jako kvalitní obalový materiál. Nepopiratelnou výhodou tohoto produktu je jeho možná recyklace a využití při druhotné výrobě dalších produktů.

2 Výroba papíru ve Štětí

Dříve než byl 30. června 1949 založen v tomto severočeském městě národní podnik Papírny Štětí, nacházel se na pravém břehu řeky Labe cukrovar. Cukr byl ve Štětí vyráběn od roku 1871 a k uzavření cukrovaru došlo rok před založením národního podniku, jemuž byl areál cukrovaru přirknut.

Prvním instalovaným strojem ve Štětí byl stroj určený k výrobě šedé vlnité lepenky od firmy Dörries, který byl instalován po nutných přestavbách závodu a výstavbě nové železobetonové haly. Již během roku 1952 došlo k založení tzv. Nového závodu, jehož součástí byla výstavba a instalace nových provozů, mezi něž patřily dřevosklad, odparka a kaustifikace, celulózka, energetika, vodárna a konečně papírna a pytlárna. K další změně názvu nově se rozrůstajícího závodu došlo v roce 1958, kdy byl přejmenován na národní podnik Severočeské Papírny Štětí (SEPAP n.p.).

Dříve než bylo započato další velké rozšíření tohoto podniku, byl mezi lety 1960 až 1963 instalován ve Štětí nový stroj na výrobu novinového papíru. ŠTĚTÍ II byl název výstavby zahájené v roce 1967, která trvala dalších sedm let a její součástí byla výstavba nových výrobních objektů a především nové biologické čističky odpadních vod s teoretickou kapacitou pro město s počtem 800 000 obyvatel.

Stejně jako pro mnoho jiných podniků v České republice se pro SEPAP n.p. stal přelomovým rokem rok 1989. Nejprve došlo ke změně statusu z národního podniku na podnik státní, aby se v roce 1992 stala ze SEPAPu akciová společnost. V roce 1995 se pak vlastníkem 22,3% akcií stala švédská společnost ASSI DOMÄN, jež se po dalších dvou letech stala majoritním vlastníkem s podílem 90% akcií společnosti. Zároveň se ziskem majoritního podílu ve společnosti došlo ke změně názvu na ASSIDOMÄN SEPAP a.s.

Při změně milénia dochází k další změně vlastníka, jímž se stává nadnárodní rakouská společnost FRANTSCHACH PULP & PAPER. Hlavními produkty vyráběnými ve Štětí se stávají buničina, pytlový papír, linery a MG papír. Po dalších třech letech dochází k dalšímu přejmenování společnosti na jméno skutečného vlastníka MONDI PACKAGING a.s., který ve štětském podniku působí do současnosti, nyní však pod názvem MONDI a.s.

3 Pytlový papír

Pytlový papír, je určen k výrobě pytlů a sáčků nejrůznějších rozměrů a vlastností. Pro tento papír jsou typickými vlastnostmi vysoká pevnost v příčném (CD) a podélném (MD) směru. Zároveň tento papír oproti např. novinovým papírům dosahuje značného protažení v obou směrech. Daných vlastností je dosaženo použitým materiálem při jeho výrobě, které tvoří vlákno jehličnanů připravené sulfátovým způsobem vaření. Pytlový papír lze vyrábět v „základní“ hnědé formě, popřípadě lze vlákno vybělit a získat tak buničinu pro výrobu bílého pytlového papíru vhodného především na vnější vrstvy pytlů a sáčků určené k potisku.

3.1 Fáze výroby pytlového papíru

Přestože od doby objevu výroby papíru uplynulo téměř dva tisíce let, podstata výroby tohoto produktu zůstává i nadále stejná. Nejprve je potřeba získat surovinu vhodnou pro výrobu papíru, kterou v našem případě tvoří vlákno jehličnatých dřevin. Dále je třeba tuto surovinu upravit, zpracovat na papírenském stroji a výsledný produkt upravit do finální podoby dle požadavků zákazníka.

Pokud se omezíme pouze na hranice závodu, lze určit pět fází výroby papíru. Jako nulovou fázi, která neprobíhá v závodu, ale je nezbytná k výrobě papíru, bychom mohli označit těžbu dřeva, potřebnou k získání celulózy a hemicelulózy, které jsou stavebními kameny pytlového papíru.

První fází probíhající již za hranicemi závodu je výroba štěpky o daných rozměrech v prostorách dřevoskladu. Tato štěpka je nasekána na požadované rozměry z polen odkorněných v odkornovacích bubnech. Další možností získání štěpky je přímý nákup od dalších zpracovatelů dřeva, jako odpadního materiálu.

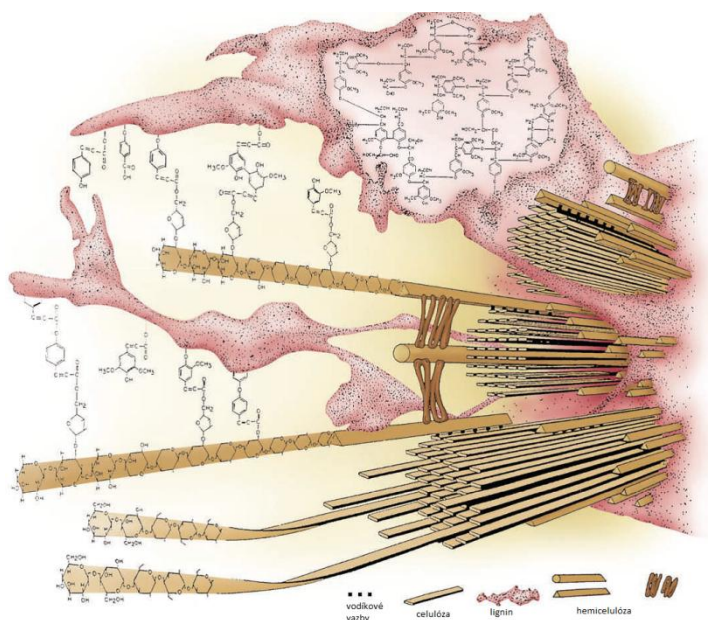
V druhé fázi již dochází k zpracování štěpky a získání vláken celulózy a hemicelulózy sulfátovým způsobem. Takto získaná štěpka je odeslána ke zpracování na přípravně látky ve třetí fázi výroby. Následuje čtvrtá fáze, v níž dochází k samotnému zpracování získané látky na papírenském stroji. Konečně v páté fázi je produkt upraven dle požadovaných specifikací.

3.2 Získání a úprava vlákna

K výrobě pytlového papíru je použito dlouhé vlákno jehličnatých stromů, a to smrku a borovice. Délka těchto vláken se pohybuje v rozmezí 3,5 - 5,0 mm a jejich tloušťka v rozmezí 25 - 45 μm .

Obecně se dřevo skládá z makromolekulárních a nízkomolekulárních látek. Makromolekulárními látkami jsou celulóza, hemicelulóza a lignin. Látky nízkomolekulární pak dělíme na organické a anorganické. Naším cílem při výrobě buničiny je maximální zisk vláken celulózy a hemicelulózy s minimálním podílem ligninu. Sulfátovým vařením tedy označujeme proces delignifikace v zásaditém roztoku za dané teploty a tlaku. Tento proces je možné provádět diskontinuálním – „batchovým“ způsobem, nebo kontinuálním způsobem ve varnách Kamyr. V případě diskontinuálního vaření je dalším krokem v úpravě buničiny bělení, zatímco při kontinuální výrobě je výsledným produktem buničina nebělená.

Před následným transportem buničiny do zásobních nádrží dojde k jejímu vytřídění a vyčištění. Zásobní nádrže jsou umístěny v blízkosti přípravné látky, jež předchází samotnému papírenskému stroji. Úkolem přípravné, jak název dané části linky napovídá, je úprava látky před distribucí na papírenský stroj. Jde především o úpravu mechanických vlastností



Obr. 1: Stavba dřeva - legenda (zleva): vodíkové vazby, celulóza, lignin, hemicelulóza [11]

jednotlivých vláken. Toho je dosaženo tzv. mletím na linkách HCR a LCR mletí. Označení těchto linek je odvozeno z anglických názvů High resp. Low Consistency Refiner, tedy mletí při vysoké resp. nízké konzistenci. V případě vysoké konzistence mluvíme o roztoku s 35% obj. podílem vláken, zatímco mletí při nízké konzistenci probíhá přibližně při 4,5% obj. podílu vláken v roztoku. Vlákno je při této operaci fibrilováno a kráceno tak, aby bylo dosaženo jeho požadovaných vlastností.

4 Papírenský stroj

Zařízení určené ke kontinuální výrobě papírového pásu o dané plošné hmotnosti, požadovaných parametrech se zajištěním co nejrovnoměrnějšího příčného a podélného profilu gramáže a vlhkosti ve vyráběném pásu. Tuto složitou výrobní linku lze rozdělit do tří základních funkčních celků, v nichž probíhá daný způsob odvodnění. Jedná se o síťovou část, lisovou a následně sušící část.

Ještě před nanesením vodolátky na nekonečné odvodňovací síto papírenského stroje je třeba buničinu vytřídit, rozbít shluky vláken a rozředit na vodolátku o konzistenci v rozmezí 0,18 – 0,25 % v závislosti na cílové plošné hmotnosti produktu. K ředění buničiny dochází ve směšovací čerpadle, do něž je přiváděna zpracovaná buničina z přípravné látky o konzistenci 4 % a voda procházející odvodňovacími prvky v síťové části. Naředená vodolátka dále pokračuje přes systém tlakového a vířivého třídění do nátoky papírenského stroje, kde je distribuována výtokovou štěrbinou na podélné odvodňovací síto.

4.1 Síťová část

V této části stroje dochází k prvnímu odvodnění vodolátky přiváděné k papírenskému stroji a k tvorbě listu papíru. Vodolátka je nanášena na nekonečné síto, jenž obíhá přes odvodňovací prvky, vodící, regulační a sací válce umístěné v této části.

Odvodňovacími prvky umístěnými v síťové části jsou lištové skříně, skrze které je voda odváděna především působením gravitační síly a mírným podtlakem vznikajícím přechodem odvodňovacího síta přes tyto prvky. Následují vakuové skříně, z nichž je voda obsažená v nově se vytvářejícím pásu papíru odváděna pomocí podtlaku, který je postupně zvyšován. Posledním odvodňovacím prvkem v síťové části je tzv. gaučový válec. Jde o válec se stacionární komorou s dvěma zónami vysokého vakua, kolem níž rotuje děrovaný plášť válce. Během doby setrvané na odvodňovací síti dochází při tvorbě papírového listu k těmto fázím: směšování, tváření, přechodná zóna a zpevňování. Konzistence vodolátky přiváděné na síto se zvýší z přibližně 0,2 % na 20 % obj. sušiny před snímáním již vytvořeného papírového pásu do lisové části.

4.2 Lisová část

Stejně jako v předcházející části stroje, i zde je voda z nově vytvořeného listu papíru odváděna mechanickým principem, kterým je v tomto případě lisování. Hlavními prvky lisové části jsou snímací válec, lisovací, vodící a regulační válce a odvodňovací prvky.

Papír je do této části snímán ze sítové části pomocí tzv. Pick Up válce. Stejně jako v předchozím případě u gaučového válce se jedná o zařízení se stacionární komorou se dvěma zónami vakua a rotujícím děrovaným pláštěm. Tento válec následuje ve směru běhu papírového listu právě za gaučovým válcem a přisává papír na odvodňovací plstěnc, který je veden přes Pick Up válec. Po tomto plstěnci je papír unášen ke styčné lince lisovacích válců, kde dojde k jeho stlačení a odvedení vylisované vody do plstěnce. Tuto styčnou linku nazýváme nip.

Lisová část bývá zpravidla sestavena z více než dvou styčných linek s postupně narůstajícím tlakem. Zároveň mohou být využity různé typy lisovacích válců s různými druhy povrchů. Od toho pak plyne i šířka nipu, která se pohybuje v rozmezí od jednotek milimetrů po desítky centimetrů u tzv. shoe pressu s rozšířenou zónou lisování.

Zatímco vstupující hodnota sušiny se pohybuje okolo 20%, hodnota sušiny v papírovém listu za lisovou částí dosahuje až 45%. Záměrem je dosažení, co možná nejvyšší hodnoty sušiny před vstupem do další části papírenského stroje, kterou je sušící část. Snížení vlhkosti papíru vystupujícího z lisové části o 1 % přináší úsporu 4 – 5 % páry a s tím spojené snížení energetické náročnosti, kdy lisování je méně energeticky náročné, než následné sušení papíru.

4.3 Sušící část

V průběhu transportu papírového pásu zbylou částí stroje je třeba docílit požadované vlhkosti v rozmezí 5-8%. Po mechanickém způsobu odvodnění pásu přichází na řadu sušení papíru přestupem tepla a odpařením požadovaného množství vody.

V případě stroje na výrobu pytlového papíru je sušící část složena ze dvou řad sušících válců, po jejichž povrchu je pás veden slalomovým způsobem a přitlačován k jejich povrchu pomocí sušících sít. Tyto válce jsou vytápěny parou, která ve válci kondenzuje a dochází k přestupu tepla z vnitřku válce přes jeho stěnu k po něm pohybujícímu se pásu papíru. Celá sušící část je obestavěna sušícím krytem, do kterého je vháněn teplý suchý vzduch, jenž na sebe naváže vodu odpařenou z papíru a následně je z krytu odtahován.

V případě výroby tzv. mikrokrepaného pytlového papíru je přibližně ve středu sušící části umístěna jednotka clupak, v níž ke krepaní dochází. Sušící část je pak rozdělena na část předsoušecí a dosoušecí. Důvodem k instalaci této jednotky je zvýšení hodnoty protažení papíru v podélném směru.

Po průchodu papíru sušící částí jsou, ještě před jeho navinutím na tambor, měřeny příčné a podélné profily gramáže a vlhkosti. Tyto základní parametry jsou sledovány online a lze tak pomocí řídicího systému dosáhnout požadovaných vlastností produktu.



Obr. 2: Kryt sušící části od společnosti VOITH [12]

4.4 Konečná úprava

Papír navinutý na tambor v plné šíři stroje je dále třeba upravit dle požadavků zákazníka. Zákazník požaduje role papíru o dané šíři a průměru. Tyto role jsou vyráběny z navinutého papíru na strojním zařízení zvaném převíječka.

Jde o stroj, na němž je papír dle požadavků rozřezán a převinut na papírové dutinky dle specifikace. Odtud jsou pak odesílány do balicí linky k opatření ochranným obalem, aby nedošlo při jejich transportu k poškození. Zabalené role putují do expedice, odkud jsou rozepisovány ke svým zákazníkům.

5 Sušení papíru na papírenském stroji

Při výrobě papíru je jednou z možností jeho usušení kontaktní sušení, kdy dochází k přestupu tepla z parou vyhřívaného sušícího válce do sušeného listu papíru. Stejně jako všechny ostatní části stroje, tak i sušící partie prošla postupem času značným vývojem.

Dříve byly sušící části papírenských strojů umístěny volně v prostoru haly. To mělo za následek hned několik negativních vlivů. Odpařovaný vlhký vzduch zaplnil prostor celé haly, kde následně docházelo ke kondenzaci vody, jež měla za následek snižování životnosti strojních částí a životnosti samotné konstrukce haly. Zároveň pracovní podmínky v takových prostorech byly nepředstavitelné.

Současné moderní sušící části jsou zcela zakryty tzv. sušícím krytem, do nějž je vháněn suchý teplý vzduch a zároveň je odtahován vlhký vzduch, jenž je využíván při předehřevu vháněného vzduchu. Sušící válce jsou umístěny ve dvou řadách, po nichž je slalomovým způsobem veden sušený papír.

5.1 Sušící kryt PS5

Sušící kryt papírenského stroje číslo 5 ve Štětí je řešen obdobným způsobem. Je rozdělen na dvě části, mezi něž je vložena mikrokreповací jednotka clupak. Kryt umístěný před tímto zařízením označujeme jako předsoušecí část, zatímco za jednotkou clupak se jedná o část dosoušecí. Předsoušecí část je tvořena sušícími válci 1 až 37. Clupaková jednotka, umístěna za předsoušecí částí, je tvořena jedním sušícím válcem a gumovou kurtou, po jejímž přitlačení na válec a průchodu papíru styčnou linkou vzniká v papíru mikrokrepa. Následující dosoušecí část pak sestává z cylindrů 42 až 54. Kromě cylindru 54, který je chladicí, je k vyhřátí sušících válců využito páry o tlaku 0,3 a 1,2 MPa.

Předsoušecí i dosoušecí část jsou dále rozděleny do jednotlivých sušících skupin. V předsoušecí části jde o skupiny jedna až čtyři, část dosoušecí tvoří pátá až osmá sušící skupina.

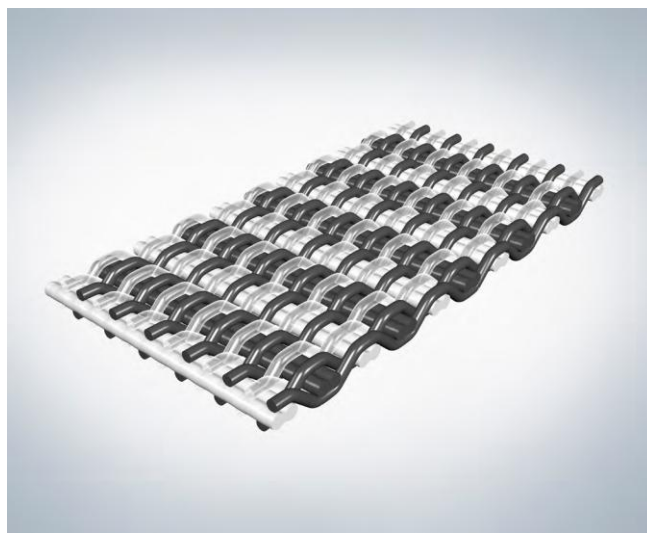
5.2 Sušící síto

Ve všech skupinách je papír po sušících válcích veden pomocí sušících sít. V prvních třech skupinách je umístěno v každé skupině jedno síto, které je vedeno po horní i spodní řadě válců. Tomuto vedení říkáme slalomové. Při tomto vedení nedochází k sušení papíru, ale jeho postupnému ohřevu. Zatímco je v horní řadě válců papír veden mezi sítom

a válcem a je tak k válci přitlačován, na spodní řadě válců je sušícím sítem pouze přidržován a unášen. Proto v těchto skupinách není spodní řada válců vyhřívána. V následujících skupinách jsou již horní a spodní síta. Ta mají zaručit dokonalé přilnutí papíru k sušicímu válci a stejnoměrný přestup tepla v celé šíři listu papíru.

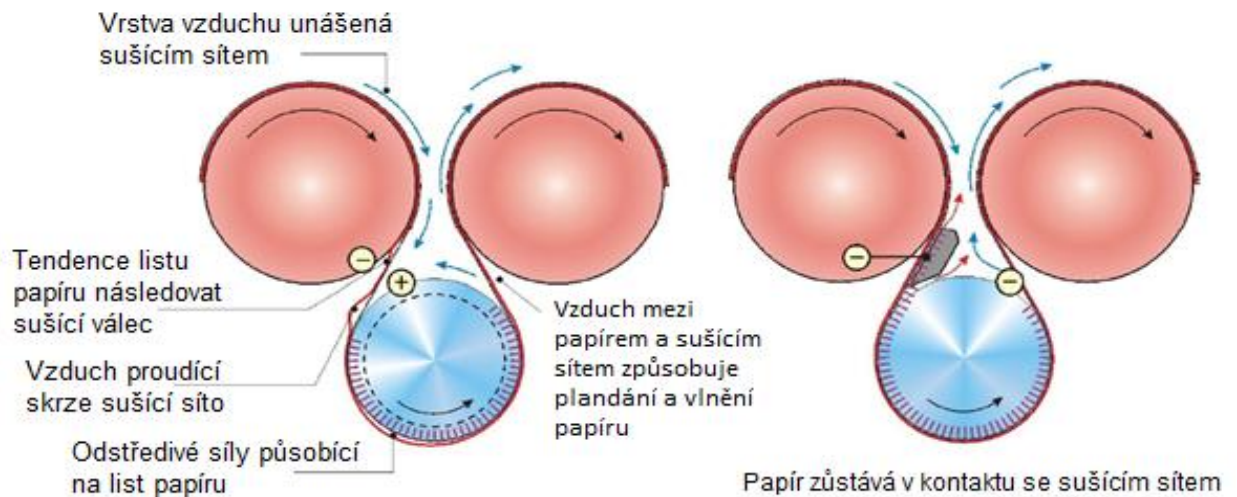
Jednou z důležitých vlastností sušícího síta je jeho propustnost. Veličinou pro měření propustnosti struktury sušícího síta je CFM (Cubic Feet of Air Per Minute), která udává kolik krychlových stop vzduchu je propuštěno skrze čtvereční stopu struktury za jednu minutu při daném podtlaku. Postupem času dochází ke snižování této hodnoty a to z důvodů znečištění síta, jeho mechanickým opotřebením a působením prostředí, v němž je síto provozováno. Se snižující se propustností struktury dochází k stále obtížnějšímu odvodu odpařené vody směrem od papíru skrze sušící síto.

Sušící síto je v sušících skupinách vedeno přes sušící válce a vodící válečky. Pro určení správné polohy síta při jeho běhu je jeden z vodících válečků upraven tak, aby na jedné straně bylo zajištěno pohyblivé uložení ložiskového domku. Poloha domku je určována systémem regulace pohybu síta a je tak zajištěná korekce běhu síta na jednu či druhou stranu sušící části. Dalším neméně důležitým parametrem je správné napnutí



Obr. 3: Ukázka sušícího síta Pyrox od společnosti VOITH [13]
síta. Jeden z vodících válečků, jenž síto obepíná, je možné stejnoměrně posouvat v celé šíři stroje, aby bylo dosaženo požadované hodnoty napnutí.

Nezbytným prvkem pro stabilizaci papírového pásu na sušícím síti především v prvních třech sušících skupinách jsou tzv. stabilizátory, které bývají označovány různými marketingovými názvy v závislosti na dodavateli zařízení. V zásadě jde o box umístěný k sušicímu sítu ze strany, na které není nesen papír. Do tohoto boxu je přiváděn suchý teplý vzduch, jenž je po obvodu boxu vyfukován a přechodem sušícího síta vzniká podtlak, který pak přidržuje papír na sušícím síti. Jednotlivé fáze běhu papíru po sušícím síti můžete vidět na následujícím obrázku (Obr. 4).



Obr. 4: Běh papíru při slalomovém vedení sušícího síta bez stabilizace a se stabilizací pomocí stabilizátoru [5]

5.3 Ventilace sušícího krytu

Součástí krytu sušící části je ventilační systém, jehož úkolem je zajistit přísun teplého suchého vzduchu do krytu a odtah vlhkého vzduchu z krytu. Pokud by nedocházelo k výměně vzduchu, došlo by k nasycení vzduchu vodní parou odpařenou z papíru a její kondenzaci uvnitř krytu. To by v důsledku zhoršovalo kvalitu konečného produktu, zkracovalo životnost zařízení a zvyšovalo náklady.

Teplý suchý vzduch je přiváděn do sušícího krytu ve spodní části. Zároveň je přiváděn do stabilizátorů a jsou s ním ofukována sušící síta v místech, kde jimi není veden papír. Během proudění teplého vzduchu ze spodní části krytu směrem k jeho stropu dochází k nasycení vzduchu odpařenou vodou z papírového pásu. Tento teplý vlhký vzduch je pak pomocí ventilace odsáván pryč ze sušícího krytu a dále z prostoru haly papírenského stroje.

Aby bylo využito tepla, které je v tomto vlhkém vzduchu obsaženo, je jeho odtah veden přes rekuperační jednotky, v nichž dochází k předehřevu čerstvého vzduchu, který je dále rozveden do haly a sušícího krytu papírenského stroje nasávaného do haly. V případě, že je teplo obsažené ve vlhkém vzduchu nedostatečné pro ohřev čerstvého vzduchu, je k jeho dohřátí využito páry.

5.4 Sušící válec

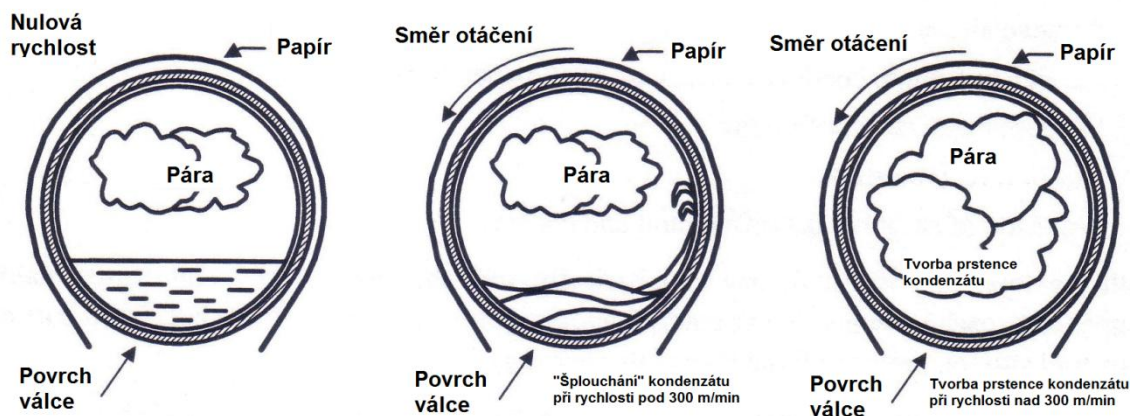
K sušení papírového pásu dochází přestupem tepla uvolňovaného kondenzací topné páry uvnitř sušícího válce. Tyto válce jsou vyráběny především z litiny. Jejich průměr se

u strojů na výrobu pytlového papíru pohybuje v rozmezí 1,5 – 1,8 m, tloušťka stěny válce od 20 do 40 mm. Délka válce je závislá od šířky stroje.

Pára je do sušícího válce přiváděna ze strany pohonu skrze parní hlavu. Ve válci dojde ke kondenzaci a uvolnění kondenzačního tepla. Vzniklý kondenzát je třeba, pro zajištění dostatečného přestupu tepla, z válce odvádět. To je zajištěno odstředivou silou působící na kondenzát při pohybu válce a rozdílem tlaků na vstupu páry do válce a na výstupu kondenzátu a brýdové páry z válce, tzv. diferenčním tlakem. Kondenzát je odváděn pomocí sifonu, na jehož konci je umístěn naběrák. Sifon je umístěn stejně jako parní hlava na straně pohonu.

Během kondenzace mohou nastat tři případy rozložení kondenzátu v sušícím válci. Pokud sušící válec stojí, nebo rotuje velmi nízkou rychlostí, hromadí se kondenzát v jeho spodní polovině a nedochází k jeho dostatečnému odvodu. To může zapříčinit zavodnění cylindru a přetížení pohonu při provozu sušící části. Při zvyšování rychlosti dochází i k pohybu kondenzátu, který ulpívá na stěnách válce a začíná tvořit prstenec, jenž je pro zajištění stejnoměrného přestupu tepla žádoucí. Do rychlosti 300 m/min však většina kondenzátu stále zůstává ve spodní polovině válce a jeho odvod je nedostatečný. Ve třetím případě je dosaženo rychlostí nad 300 m/min. Kondenzát tvoří stejnoměrný prstenec okolo povrchu celého válce. Všechny tři případy jsou znázorněny na následujícím obrázku.

Zároveň jsou po vnitřním obvodu sušícího válce instalovány takzvané rozrážecí tyče – spoilery, jejichž úkolem je narušovat vrstvu kondenzátu a vytvářet v něm turbulentní proudění, při kterém dochází k lepšímu přenosu tepla. Tyto tyče mají čtvercový nebo obdélníkový průřez o daných rozměrech a jsou rovnoměrně rozprostřeny po celém obvodu. Jejich instalace je zajištěna rozpěrnými pružinami, které zajišťují jejich rozložení ve válci. Spoilery musí být umístěny tak, aby nezasahovaly do prostoru, ve kterém je umístěn sifón pro odběr kondenzátu.



Obr. 5: Chování kondenzátu v sušicím válci [5]

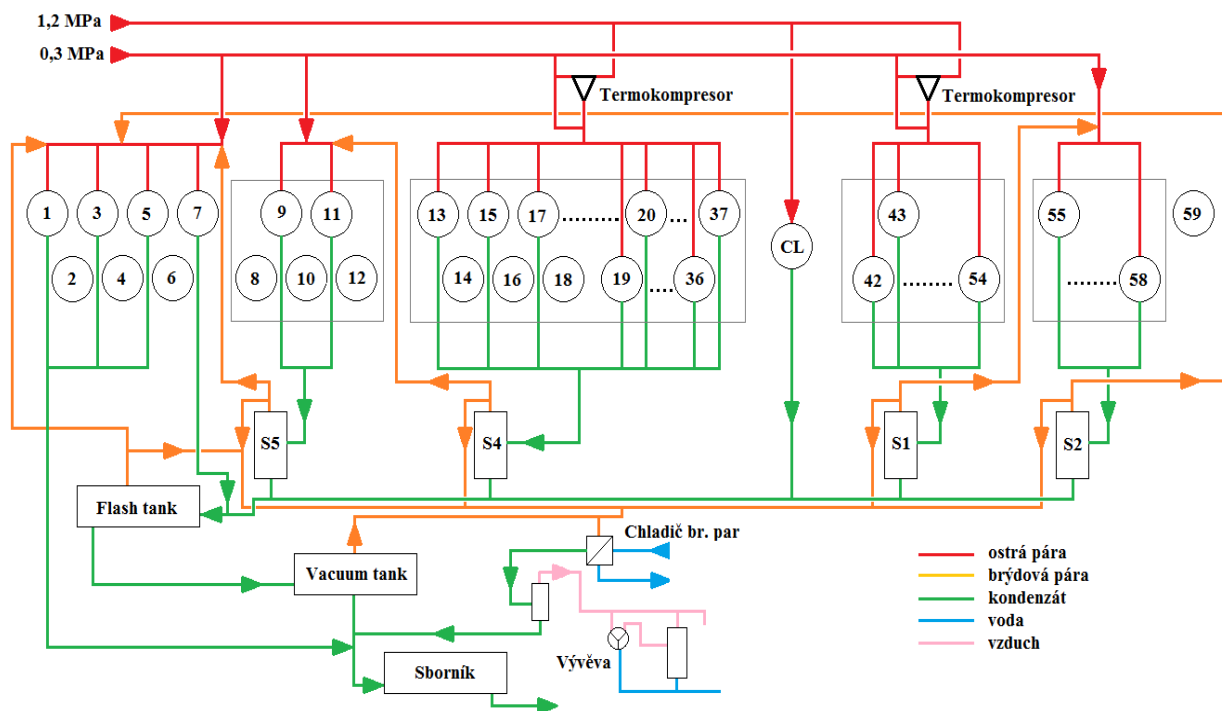
5.5 Paro-kondenzátní systém

Vytápění sušící části papírenského stroje číslo pět je zajištěno parou o tlaku 0,3 MPa a 1,2 MPa. Paro-kondenzátní systém je řešen kaskádou, kdy „hlavní“ sušící skupina je vytápěna ostrou parou a skupina navazující v kaskádě je vytápěna brýdovými parami odcházejícími z hlavní sušící skupiny.

Jak bylo zmíněno sušící část PS5 je tvořena předsoušecí a dosoušecí částí. V předsoušecí části je hlavní sušící skupinou čtvrtá skupina, která je vytápěna parou o tlaku 0,3 MPa. Pokud je tento tlak nedostatečný, je zde umístěn termokompresor, v němž dochází k míšení páry o tlaku 0,3 MPa a 1,2 MPa. Maximální tlak páry, jímž je možno hlavní skupinu vytápět činí 0,5 MPa. Stejná situace je i v dosoušecí skupině, kde hlavní sušící skupinou je skupina číslo 5.

Směs brýdové páry a kondenzátu je z hlavní sušící skupiny svedena do daného separátoru, kde je oddělen kondenzát od páry a brýdová pára je využita při vytápění předcházející sušící skupiny. Stejně jako v případě hlavní sušící skupiny je i ze skupin připojených v kaskádě směs kondenzátu a brýdových par svedena do příslušného separátoru.

Kondenzát je ze všech separátorů odváděn do flash tanku, odkud jsou vzniklé brýdové páry použity v prvních třech vytápěných cylindrech a kondenzát čerpán dál do vakuum tanku. Zbylé množství brýdových par z vakuum tanku je zkondenzováno na chladiči brýdových par a zbylý kondenzát je před transportem na kotelnu shromažďován v zásobní nádrži kondenzátu.



Obr. 6: Schéma paro-kondenzátního systému PS5

5.6 Odstavení a najetí parní skupiny

Stejně jako na jiných výrobních zařízeních i na papírenském stroji je třeba v určitých časových intervalech provádět pravidelné servisní odstávky, jejichž cílem je předcházet neplánovaným odstavením stroje. Ve většině případů dojde během těchto odstávek i k odstavení paro-kondenzátního systému, aby na něm mohly být provedeny nutné údržbové práce.

Po odstavení stroje se uzavřou vstupy média do systému. Postupným chladnutím zkondenzují v sušících skupinách zbytky par a v systému vzniká podtlak. Jeho působením dochází k nasátí vzduchu netěsnostmi do paro-kondenzátního systému.

V sušících válcích a rozvedech páry se tak před najetím stroje vyskytuje kondenzát a vzduch. Zatímco kondenzát během provozu tvoří ve válci prstenec o dané tloušťce, jak bylo popsáno dříve, je přítomnost vzduchu (či jakéhokoliv jiného inertního plynu) v systému nežádoucí. Důvodem jsou velmi dobré izolační vlastnosti těchto plynů a tedy snižování výkonu sušící části a růst nákladů s tím spojených. Je velmi důležité, jak je při najíždění stroje provedeno natlakování paro-kondenzátního systému. Pro správný a hospodárný provoz systému je třeba odstranit co možná největší množství v něm obsaženého vzduchu.

6 Vliv vzduchu na sušení papíru

Vzduch má velmi dobré tepelně-izolační vlastnosti díky nízkému součiniteli tepelné vodivosti. Příkladem může být tenká vzduchová izolační vrstva mezi tabulemi skla v konstrukci okna, kdy sklo z hlediska izolační funkce nemá žádný vliv a vymezuje pouze prostor, v němž se nachází izolační vrstva vzduchu. Stejně jako u oken, tak i u izolačních materiálů tvořených ze skleněných či čedičových vláken je vzduch nacházející se v mikroskopických pórech izolantem, zatímco vlákna vytváří vhodnou strukturu pórů, v nichž se vzduch nachází.

Jako izolant pak působí vzduch i v paro-kondenzátních soustavách. Jeho tenká vrstva vznikající na pomezí kondenzátu a páry zabraňuje přenosu tepla k teplosměrné ploše a snižuje tak přestup tepla k ohřívanému materiálu. Součinitel tepelné vodivosti klidného vzduchu při teplotě 100 °C je přibližně 0,029 W/m*K, v případě vody činí maximálně 0,679 W/m*K a v případě litiny je hodnota rovna 50 W/m*K. Z uvedeného vyplývá, že vrstva vzduchu o tloušťce necelých 0,6 mm má stejné izolační vlastnosti jako litina o tloušťce 1 m.

Mimo to, že vzduch v systému působí jako izolant, je zároveň mísitelný s parou a vzniká tak paro-vzdušná směs. Tato směs dosahuje nižší teploty než samotná pára. Dochází tak k poklesu tepla předaného ohřívanému materiálu. Z platnosti Daltonova zákona plyne, že tlak na jednotkový objem směsi je roven součtu parciálních tlaků vzduchu a samotné páry. To znamená, že v případě paro-vzdušné směsi je tlak páry ponížen o parciální tlak vzduchu obsaženého ve směsi.

Máme-li paro-vzdušnou směs, jejíž tlak činí 0,2 MPa (absolutní tlak 0,3 MPa) a je tvořena jedním dílem vzduchu a dvěma díly čisté páry, pak parciální tlaky jednotlivých složek jsou:

- vzduch $0,3 * 1/3 = 0,1$ MPa (absolutní tlak)
- čistá pára $0,3 * 2/3 = 0,2$ MPa (absolutní tlak).

Teplota syté páry v paro-vzdušné směsi, při absolutním tlaku 0,2 MPa činí 120,23°C v případě čisté páry o tlaku 0,3 MPa pak 133,54°C. Výměník tepla, v němž je tato paro-vzdušná směs obsažena se pak chová tak, jako by v něm byla pára o tlaku 0,2 MPa, přestože na manometru měřená hodnota ukazuje 0,3 MPa. Může tak docházet k růstu nákladů spojených s výrobou, nebo v horším případě k produkci výrobků se zhoršenou kvalitou či výrobě zmetků.

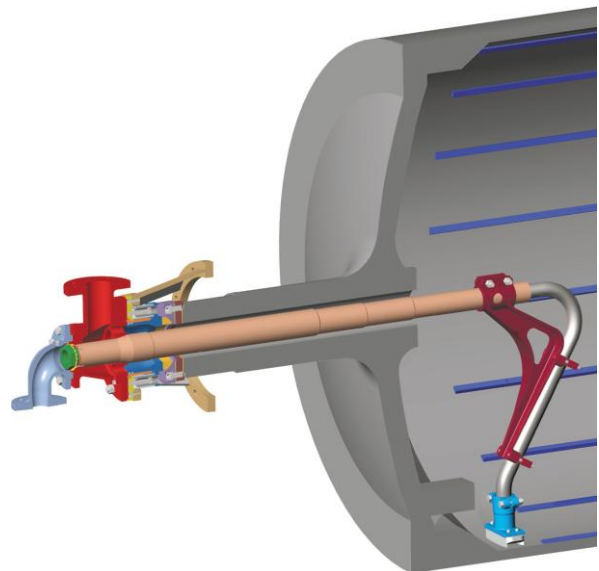
7 Odvod kondenzátu a jeho vliv na sušení

Stejně jako v případě vzduchu je kondenzát obsažený v sušících válcích izolantem, jenž snižuje výkon sušící části. Kondenzát ve válci vzniká kondenzací topného média - páry a uvolněné skupenské teplo kondenzace je předáváno do sušeného papíru.

Během provozu stroje je potřeba kondenzát z válců odvádět, aby nedošlo k jejich zaplavování a snižování výkonu sušících skupin. Se zvyšujícím se objemem kondenzátu ve válcích zároveň roste spotřeba elektrické energie a dochází k opotřebení mechanických částí. Důvodem je zvyšující se celková hmotnost válců a s ní související zatížení jak pohonů, tak jednotlivých částí.

K odvádění kondenzátu ze sušícího válce je využito difference mezi tlakem páry na vstupu do sušícího válce a výstupu kondenzátu z válce. Další hybnou silou je odstředivá síla působící na kondenzát v rotujícím válci. Skrze parní hlavu, jíž je přiváděna pára do válce, je veden odvod kondenzátu. Ten je řešen stacionárním nebo rotačním sifonem. V případě papírenského stroje číslo 5 je využito stacionárního sifonu u všech válců sušících skupin. Pouze v případě clupakového válce je uvnitř umístěn rotační sifon. Ten rotuje společně s válcem a odebírá vzniklý kondenzát. V případě stacionárního sifonu rotuje pouze válec a sifon ve svislé poloze směřuje ke spodní části cylindru. Sifon je ukončen naběrákem, skrze nějž kondenzát odchází.

Velmi důležitá je pozice sifonu vůči vnitřní stěně válce. Pokud by došlo ke kontaktu válce s naběrákem, hrozí jeho poškození a zaplavení válce kondenzátem. Bude-li však naběrák sifonu umístěn příliš daleko od stěny válce, nebude kondenzát dostatečně odváděn a ve válci nedojde ke tvorbě rovnoměrného prstence kolem celého vnitřního obvodu cylindru. Vznikne větší izolační vrstva, a pokud nebude kondenzát rovnoměrně rozprostřen, dojde ke zhoršení příčného vlhkostního profilu v listu papíru z důvodu nestejněmého přestupu tepla.

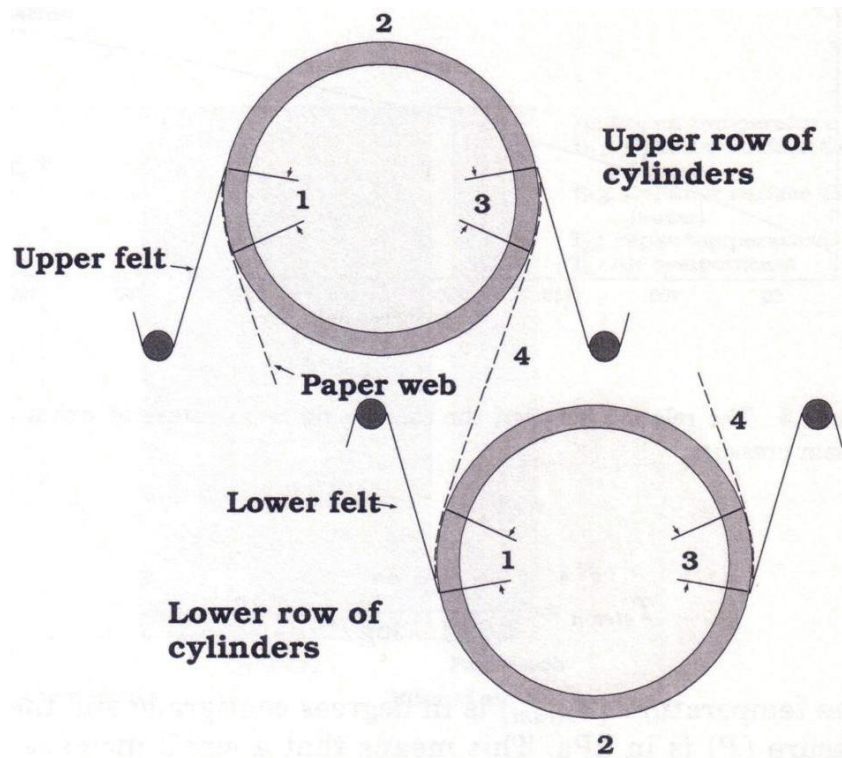


Obr. 7: Řešení stacionárního sifonu a parní hlavy společnosti KADANT [14]

8 Fáze sušení papíru

V případě konfigurace sušící části papírenského stroje číslo 5, kde jsou válce umístěny ve dvou řadách a v každé z nich obíhá sušící síto, probíhá proces sušení ve 4 fázích. Během každé z nich dochází k individuálnímu přenosu tepla a hmoty, k specifické rychlosti odpařování a ohřátí papírového pásu. Průběh jednotlivých fází můžete vidět na následujícím obrázku, kde označení danými čísly představuje tyto fáze:

1. List papíru je z jedné strany v kontaktu s povrchem válce, zatímco druhá strana je vystavena proudu vzduchu. V této fázi je odpařování vody nejnižší.
2. List papíru zůstává v kontaktu s povrchem sušícího válce a je k němu z druhé strany přitlačován sušícím sítem. Dochází k růstu přestupu tepla, avšak přenos hmoty je omezen propustností sušícího síta. Během této fáze dojde k nárůstu teploty listu papíru a k maximálnímu přenosu tepla z válce do papíru.
3. Sušící síto se vzdaluje od listu papíru, zatímco ten je neustále v kontaktu se sušícím válcem. Na straně papíru, jenž není v kontaktu s válcem, dochází k odparu vody.
4. V tuto chvíli je list papíru ve „volném“ tahu, což znamená, že není podepřen ani z jedné strany. Odpařování vody probíhá z obou stran listu papíru a snižuje se jeho teplota. V této fázi je rychlost odpařování nejvyšší.



Obr. 8: Fáze sušení papíru [5]

9 Kondenzace par a přenos tepla

Kondenzací páry rozumějme proces změny plynné fáze ve fázi kapalnou, při němž dochází ke sdílení tepla a přenosu hmoty. Lze jej rozdělit na jednotlivé děje, jež na sebe navazují. Těmito ději jsou:

1. Přívod páry na rozhraní obou fází transportem molekul.
2. Kondenzace páry probíhá na rozhraní obou fází.
3. Výparné teplo je vedeno k ochlazované stěně vrstvou kondenzátu.

Pára kondenzuje na ochlazované stěně jedním z následujících způsobů. Prvním je kondenzace souvislého filmu, který označujeme jako blánovou kondenzaci. Druhou z variant je kondenzace kapková, při níž, jak název napovídá, dochází ke tvorbě kapiček kondenzátu. To zda dojde ke kondenzaci blánové či kapkové určuje okrajový úhel beta. Tento úhel získáme z rovnice:

$$\sigma_{sp} - \sigma_{sk} = \sigma_{kp} \cos \beta, [2]$$

kde:

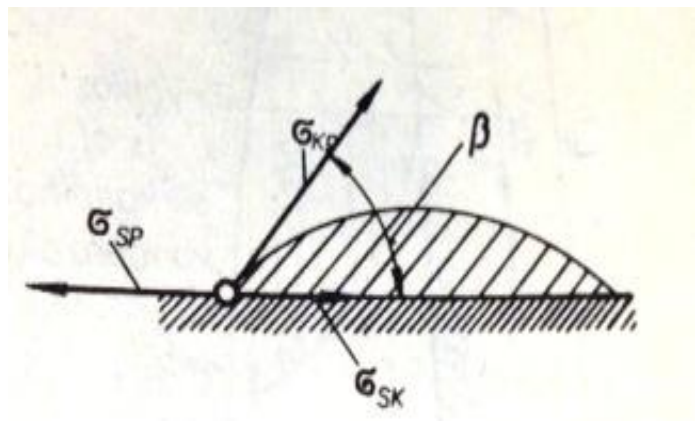
σ_{sp} ... povrchové napětí stěny proti páře

σ_{sk} ... povrchové napětí stěny proti kapalině

σ_{kp} ... povrchové napětí kapaliny proti páře.

Levá strana této rovnice je označována jako smáčivé napětí σ_o . Poměry povrchových napětí na okrajích kapky jsou vyznačeny na následujícím obrázku. V případech, kdy úhel beta je roven nule, dochází k vytváření filmu na ochlazované stěně a tedy k blánové kondenzaci. K tomuto typu kondenzace dochází na čisté, drsné i hladké ploše vždy, pokud kondenzuje čistá pára.

Pokud se na povrchu plochy vyskytne látka, která ji učiní nesmáčivou, popřípadě je tato látka parou unášena, dochází ke kondenzaci kapkové. Pro kapkovou kondenzaci jsou nejlepšími podmínkami: malá vazkost



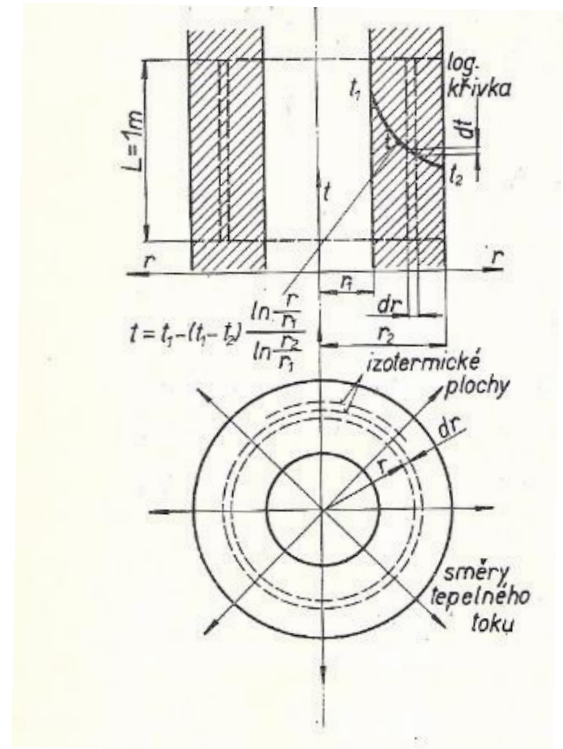
Obr. 9: Povrchové napětí na okraji kapky při nedokonalém smáčení [2]

kondenzátu, hladkost povrchu, velké povrchové napětí, nízká kondenzační rychlost a nesmáčivost.

9.1 Stacionární vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou

Bude-li uvažována válcová stěna o vnitřním poloměru r_1 a vnějším poloměru r_2 a tepelná vodivost λ bude stálá, pak povrchová teplota na poloměru r_1 odpovídá t_1 a povrchová teplota na poloměru r_2 činí t_2 . Zároveň je teplota $t_2 < t_1$ a ke změně teploty dochází pouze v radiálním směru a tedy teplotní pole je jednorozměrné. Válcové plochy soustředné s povrchovými plochami trubky jsou izotermické plochy.

Zvolíme-li si v libovolné vzdálenosti r od osy válcovou vrstvu o tloušťce dr , můžeme množství tepla procházejícího touto vrstvou určit pomocí Fourierova zákona:



Obr. 10: Jednoduchá válcová stěna [2]

$$Q = -\lambda S \frac{dt}{dr} = -\lambda 2\pi r L \frac{dt}{dr} [W] \quad (1)$$

Separací proměnných a následnou integrací získáme vztah:

$$dt = -\frac{Q}{\lambda 2\pi L} \frac{dr}{r} \quad \text{resp.} \quad t = -\frac{Q}{\lambda 2\pi L} \ln r + C \quad (2)$$

Po dosazení t_1 , r_1 a t_2 , r_2 získáme pro výpočet teplot následující vztahy:

$$t_1 = -\frac{Q}{\lambda 2\pi L} \ln r_1 + C \quad t_2 = -\frac{Q}{\lambda 2\pi L} \ln r_2 + C \quad (3)$$

Rozdíl teplot t_1 a t_2 :

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{\lambda 2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q}{\lambda 2\pi L} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

Konečně z této rovnice vyjádříme hledané množství tepla:

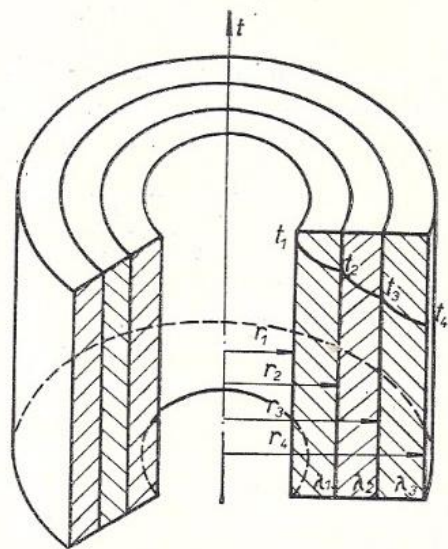
$$Q = \frac{2\lambda\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2\lambda\pi L}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) \quad (5)$$

Pro výpočet teploty t v libovolném bodě válcové plochy dosadíme hodnotu konstanty C a hodnotu Q do druhé rovnice (2):

$$t = t_1 - \frac{Q}{\lambda 2\pi L} \cdot \ln \frac{r}{r_1} = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \ln \frac{d}{d_1} = t_1 - (t_1 - t_2) \cdot \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (6)$$

9.2 Stacionární vedení tepla složenou válcovou stěnou

V průmyslové praxi se často setkáváme s vedením tepla složenou válcovou stěnou, jež se skládá z několika vrstev o různé tepelné vodivosti. Pokud jsou dvě sousední vrstvy v dokonalém styku, lze předpokládat, že jsou jejich povrchové teploty stejné. Máme-li válcovou stěnu složenou ze tří vrstev, bude teplota vnitřního povrchu t_1 a teploty vnějšího povrchu t_4 . Teploty t_2 a t_3 jsou



teploty na jednotlivých styčných plochách a nejsou nám známy. Za předpokladu, že vedení tepla je stacionární, můžeme říci, že množství tepla protékající jednotlivými vrstvami je stejné a konstantní:

Obr. 11: Složená válcová stěna [2]

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{2\pi L(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} = \frac{2\pi L(t_3 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} \quad (7)$$

Z těchto rovnic pak lze určit změnu teplot pro každou jednotlivou vrstvu:

$$(t_1 - t_2) = \frac{Q}{2\pi L} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (t_2 - t_3) = \frac{Q}{2\pi L} \cdot \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}; \quad (t_3 - t_4) = \frac{Q}{2\pi L} \cdot \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3} \quad (8)$$

Sečteme-li jednotlivé rovnice, dostaneme výsledný rozdíl teploty mezi vnitřní a vnější vrstvou:

$$(t_1 - t_4) = \frac{Q}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3} \right) \quad (9)$$

Pokud známe výsledný rozdíl teplot, můžeme určit množství tepla vedeného složenou válcovou plochou:

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} \quad (10)$$

Teploty „vnitřních“ vrstev pak lze vypočítat dle následujících rovnic:

$$t_2 = t_1 - \frac{Q}{2\pi L} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (11)$$

$$t_3 = t_2 - \frac{Q}{2\pi L} \cdot \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} = t_1 - \frac{Q}{2\pi L} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} \right) \quad (12)$$

9.3 Vedení tepla stěnou sušícího válce

V případě sušícího válce lze tedy předpokládat, že bude docházet ke stacionárnímu vedení tepla složenou stěnou, tak jak bylo uvedeno v předchozí kapitole. Tato složená stěna se bude v našem modelovém případě skládat z následujících vrstev:

- stěna sušícího válce
- vrstva kondenzátu
- vrstva inertního plynu – vzduchu
- pára.

Způsob přenosu tepla během sušení papírového pásu, kdy je sušící část tvořena právě sušícími válci, je kondukce. Dochází při ní k vedení tepla uvolněného při kondenzaci páry přes stěnu sušícího válce do sušeného papíru. Zároveň dochází i ke konvektivnímu přenosu tepla a to především u systému ventilace sušícího krytu. V případě výroby tzv. tissue papíru, nebo-li hygienických papírů, vyráběných výhradně ze 100 % celulózy při nízkých plošných gramážích, (toaletní papíry, papírové kapesníky, apod.), je konvekční způsob přenosu tepla tím nejdůležitějším. Základní tvar pro jednorozměrné vedení tepla je uveden v následujících rovnicích:

- kondukce $Q = \lambda \cdot A \cdot \Delta t / \Delta X$ (13)

- konvekce $Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta t$, (14)

- kde:

- Q ... množství přeneseného tepla $\left[\frac{J}{s}, W \right]$

- λ ... tepelná vodivost $[W/mK]$

- A ... velikost teplosměrné plochy $[m^2]$

- t ... teplota $[^\circ C]$

- X ... tloušťka stěny $[m]$

- α ... součinitel přestupu tepla $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Z uvedených rovnic plyne, že množství přeneseného tepla při kondukčním způsobu vedení je přímo úměrná tepelné vodivosti k a teplotnímu gradientu $\Delta T / \Delta X$.

9.4 Odpor při přenosu tepla ze sušícího válce

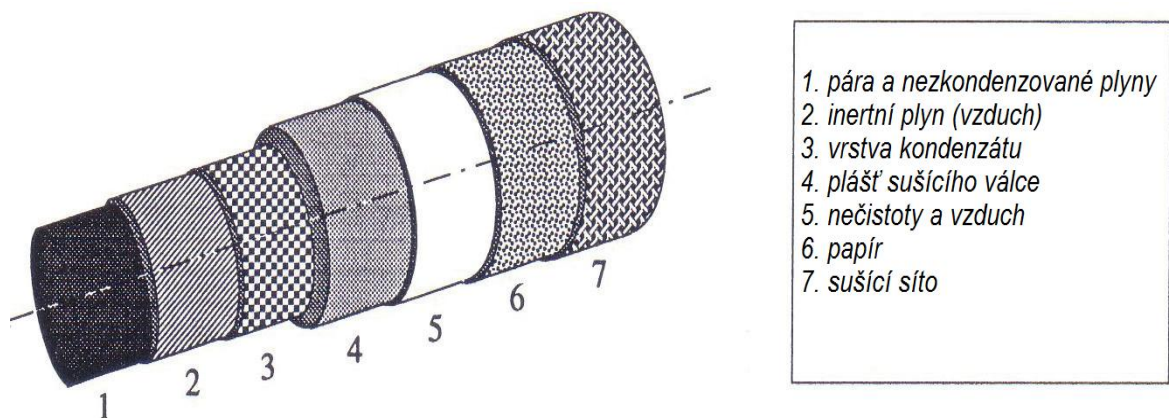
Teplu je přenášeno z oblastí s vysokými teplotami do oblastí s nižší teplotou. Množství přenášeného tepla z horké páry uvnitř sušícího válce k chladnějšímu pásu papíru závisí na celkovém teplotním gradientu a daných teplotních odporech prostředí.

$$Q = k \cdot A \cdot (t_S - t_P), \quad (15)$$

kde:

- Q ... množství přeneseného tepla
- k ... celkový součinitel prostupu tepla
- A ... plocha
- t_S ... teplota páry
- t_P ... teplota papíru.

Na následujícím obrázku můžete vidět znázorněny jednotlivé vrstvy představující odpor prostředí při přenosu tepla z vnitřku válce k sušenému papíru. Výpočet hodnot tepelného toku danými vrstvami je uveden v následující tabulce.



Obr. 12: Prostředí uvnitř a vně válce [5]

Symboly uvedené v následující tabulce představují:

- q ... množství protékajícího tepla danou vrstvou pokud $L = 1$ m
- λ ... tepelná vodivost
- d ... průměry jednotlivých vrstev
- t ... teploty na jednotlivých vrstvách.

Zdroj odporu	Tepelný tok
Vrstva vzduchu	$q_1 = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}$
Vrstva kondenzátu	$q_2 = \frac{2\pi(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}$
Plášť válce	$q_3 = \frac{2\pi(t_3 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3}}$
Přechodový odpor	$q_4 = \frac{2\pi(t_4 - t_5)}{\frac{1}{\lambda_4} \cdot \ln \frac{d_5}{d_4}}$
Papír	$q_5 = \frac{2\pi(t_5 - t_6)}{\frac{1}{\lambda_5} \cdot \ln \frac{d_6}{d_5}}$

Tab. 1: Zdroje odporu a tepelné toky [5]

Vzhledem k tomu, že při ustálených podmínkách je přenos tepla skrze každou plochu stejný, můžeme říci, že si jsou všechna q rovna:

$$q = \frac{2\pi \sum \Delta T_i}{\sum R_i} \quad (16)$$

$$Q = 2\pi Lk(t_1 - t_4) \quad (17)$$

kde R_i jsou tepelné odpory jednotlivých vrstev

$$k = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\lambda_4} \ln \frac{d_5}{d_4} + \frac{1}{\lambda_5} \ln \frac{d_6}{d_5}} \quad (18).$$

Z uvedených rovnic jasně plyne, že pokud požadujeme nárůst přeneseného množství tepla, je nutné v co největší možné míře snížit obsah inertního plynu v paro-kondenzačním systému, zajistit dostatečný odvod kondenzátu ze sušících válců, popřípadě zvýšit počet sušících válců instalovaných v sušící skupině.

10 Sušící část papírenského stroje č. 5

Původní konfigurace sušící části PS5 po její výstavbě v roce 1975 obsahovala celkem 59 sušících válců, z nichž první tři sušící válce ve spodní řadě na začátku sušící části nebyly vytápěny. V této partii byl papír veden sušícím sítím instalovaným slalomovým vedením. Nebyl tedy sušícím sítím přitlačován k povrchu spodních válců, ale byl jím pouze nesen.

Významným zásahem do sušící části bylo její rozdělení na část pedsoušecí a dosoušecí, mezi něž byla vložena mikrokrepovací jednotka clupak. Pro instalaci tohoto zařízení bylo třeba demontovat čtyři sušící válce přibližně v polovině stroje a nad nově rozdělenou sušící částí vybudovat nový sušící kryt. Pozice válců, jež byly ze sušící části vyjmuty, jsou číslo 38 až 41. Přesto zůstalo původní značení válců a tak jsou i nadále v sušící části umístěny válce 1 až 59, vyjma čtyř výše uvedených.

Součástí rekonstrukce sušící části byla i přestavba paro-kondenzátního systému. Dopusud byl řešen vstup páry do sušících válců ze strany pohonu a odvod směsi kondenzátu a brýdové páry ze strany obsluhy stroje. Po rekonstrukci společností Kadant byl vstup i výstup vyřešen parní hlavou na straně pohonu a ze strany obsluhy tak byly odstraněny potrubní trasy, jež byly překážkou při čištění stroje během přetrhů. Zároveň byl upraven rozvod páry, instalovány termokompresory a modernizován kaskádový systém vytápění sušících skupin.

Další úpravou byla změna posledního sušícího válce č. 59 na válec chladící, jenž je chlazený vodou a zajištění jejího odvodu z válce je tlakovým vzduchem. Důvodem k této změně bylo snížení „teplotního šoku“ papíru po jeho výstupu ze sušícího krytu na navíječ stroje.

Konečně poslední úprava sušící části stroje proběhla během říjnové hlavní odstávky v roce 2015, kdy došlo k instalaci nových pohonů a vlivem rekonstrukce lisové části, jež předchází části sušící, i k novému rozdělení sušících partií, kdy sušící síto již není vedeno slalomovým způsobem pouze v první sušící partii, ale i v druhé a došlo tak ke snížení počtu vytápěných válců. To bylo umožněno díky zvýšení sušiny v papírovém pásu na výstupu z lisové části.

10.1 Rozměry sušících válců

Celkový počet sušících válců instalovaných ve stroji je tedy 55. Současně však pouze 46 je vytápěno parou o požadovaném tlaku a tedy i teplotě. Všechny tyto válce mají stejné rozměry.

V jednotce clupak, jež nahradila čtyři sušící válce, je instalován také cylindr vytápěný parou. Tento válec ovšem neslouží k sušení papíru, ale je zde třeba dosáhnout určité teploty pro správnou funkci tohoto zařízení při tvorbě mikrorepu v papíru. Na rozdíl od ostatních cylindrů se liší ve svém průměru a povrchu pláště, který je potažen vrstvou zaručující jeho hladkost.

Data o sušícím válci PS5:

- Pracovní délka: 7.213 mm
- Průměr: 1.524 mm
- Váha: 10.500 kg
- Tloušťka stěny: 28,5 mm
- Materiál: ČSN 42 2650

Data o clupakovému válci:

- Pracovní délka: 7.245 mm
- Průměr: 1.220 mm
- Váha: 12.500 kg
- Tloušťka stěny: 51 mm
- Tloušťka vrstvy: 0,165 mm
- Materiál válce: ocel tř. 11
- Materiál vrstvy: chrom

10.2 Topné médium sušící části PS5

Ke stroji PS5 je přiváděna pára parovodem z úseku energetiky. Tlak přiváděné páry do rozvodny je 0,3 MPa a 1,2 MPa. Z rozvaděčů každé z nich je dále směřována k zařízením, v nichž je využívána. Největším spotřebičem páry papírenského stroje je samozřejmě jeho sušící část.

K vyhřátí clupakového válce je využito páry o tlaku 1,2 MPa a maximální nastavená hodnota tlaku v tomto válci činí 650 kPa. V případě sušící části je využito nejprve páry o tlaku 0,3 MPa a teprve pokud je nedostatečný výkon sušící části, dochází k zvýšení tlaku

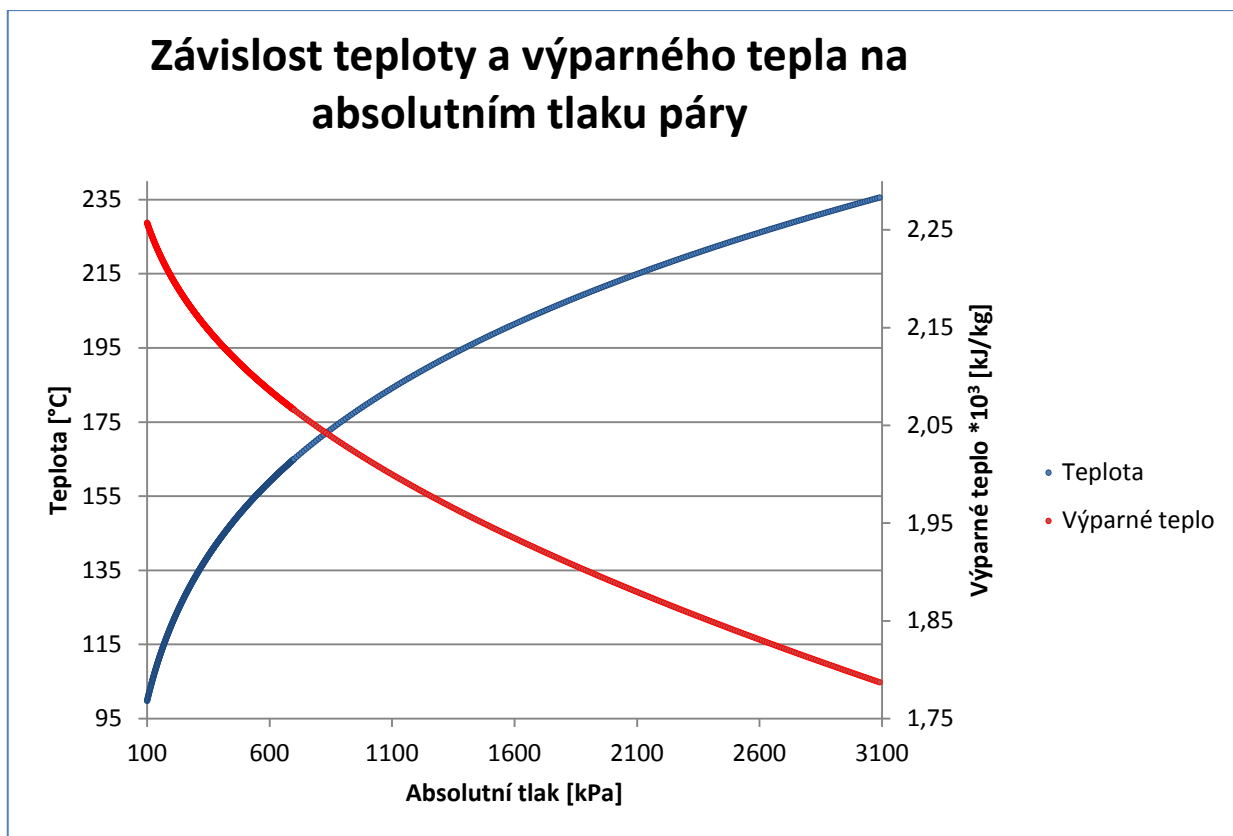
topného média pomocí termokompresorů v nichž je pára smíchána a maximální hodnota tlaku pak činí 500 kPa. Tyto termokompresory jsou připojeny k hlavním sušicím skupinám pedsoušecí a dosoušecí části. Sušící skupiny zapojené v kaskádě pak využívají brýdových par z hlavních sušících skupin s možností využití páry o tlaku 0,3 MPa pro navýšení výkonu.

V ideálním stavu by k odpaření jednoho kilogramu vody měl vystačit jeden kilogram páry. Při přenosu tepla složenou válcovou stěnou však dochází k určitým ztrátám. Zároveň je zde potřeba tzv. profukové páry, jejímž úkolem je zajištění správného odvodu kondenzátu skrze sifon. Množství této páry se u stacionárních sifonů pohybuje v rozmezí 10-20 %, resp. 25-30% u sifonů rotačních z celkového množství použité páry. V praxi se spotřeba páry pohybuje v rozmezí 1,1 – 1,6 kg páry/kg odpařené vody v závislosti na konfiguraci stroje.

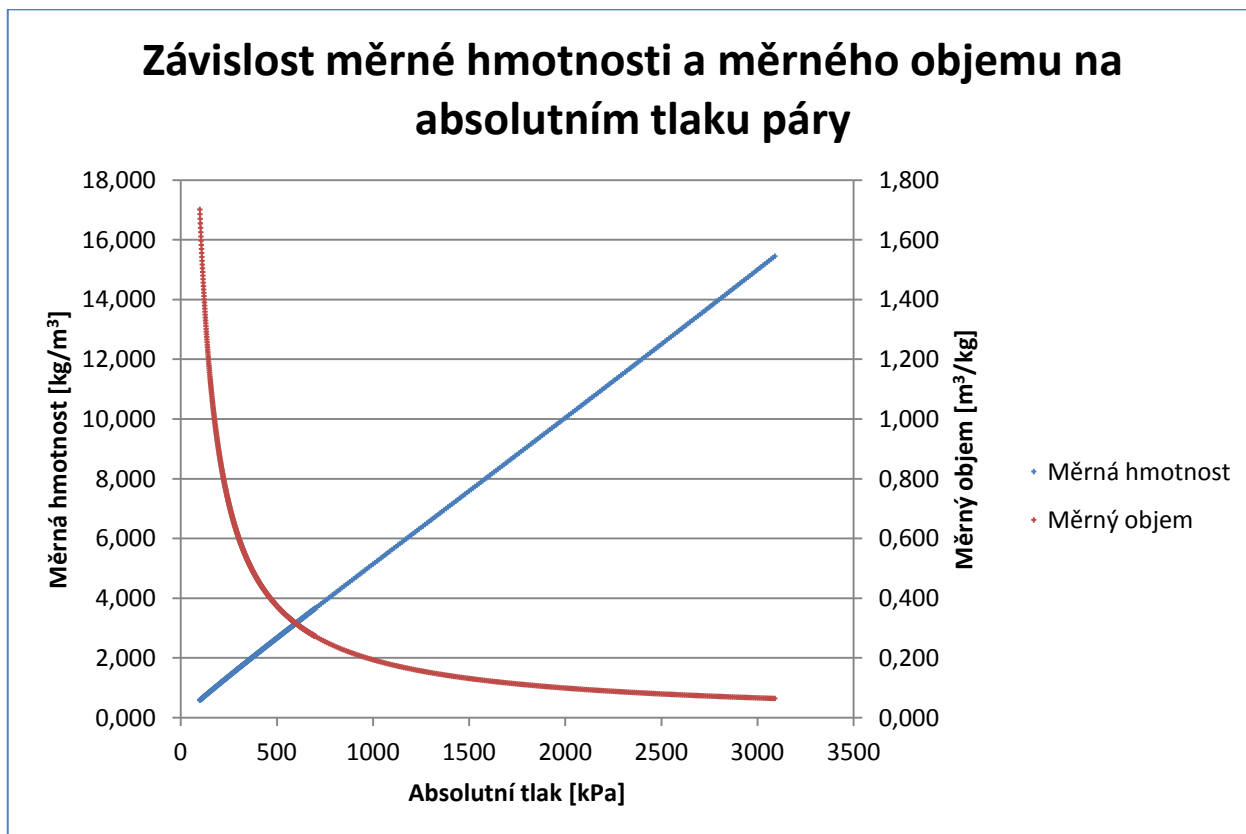
Vlastnosti topné páry:

Tlak	Teplota	Měrný objem	Měrná hmotnost	Měrná entalpie páry	Měrná entalpie kapaliny	Výparné teplo
p	T	v''	ρ''	h''	h'	h'' – h'
MPa	°C	m ³ /kg	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
0,1	120,449	0,880396	1,13585	2.706,88	505,725	2.201,16
0,3	143,762	0,461020	2,16910	2.738,70	605,453	2.133,24
0,62	166,197	0,265165	3,77123	2.764,63	702,687	2.061,94
1,2	191,691	0,151051	6,62028	2.787,11	815,171	1.971,94

Tab. 2: Vlastnosti páry



Graf 1: Závislost teploty a výparného tepla na absolutním tlaku páry



Graf 2: Závislost měrné hmotnosti na absolutním tlaku páry

11 Teoretický výpočet teploty povrchu clupakového válce

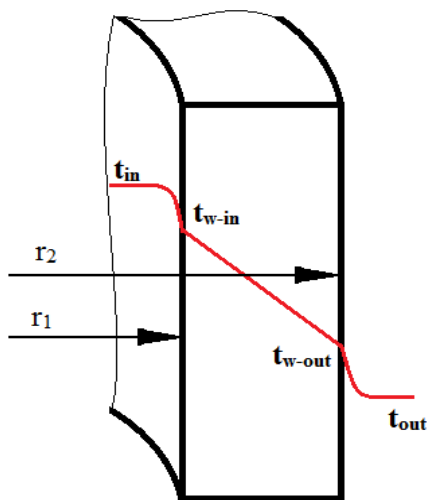
V následující kapitole je proveden výpočet povrchové teploty pláště clupakového válce při různých modelových situacích. Hodnota tlaku páry při výpočtech činí 620 kPa. Důvodem ke zvolení této hodnoty jsou měření reálné povrchové teploty, jež byla prováděna při stejném tlaku a budou porovnána s teoretickým výpočtem.

Při teoretických výpočtech budou posuzovány následující modelové situace:

- povrchová teplota clupakového válce při přenosu tepla pouze stěnou válce
- povrchová teplota clupakového válce při přenosu tepla stěnou válce a vrstvou kondenzátu
- povrchová teplota clupakového válce při přenosu tepla stěnou válce, vrstvou kondenzátu a vrstvou vzduchu

11.1 Povrchová teplota při přenosu tepla stěnou válce

Pro výpočet teploty na povrchu clupakového válce využijeme rovnic [13] a [14] uvedených v kapitole 9.3. V této modelové situaci je počítáno s přestupem tepla válcovou stěnou, kdy známe teplotu média uvnitř válce, teplotu vzduchu vně, součinitele přestupu



Obr. 13: Průběh teplot na řezu pláštěm válce

tepla mezi jednotlivými prostředími a tepelnou vodivost materiálu, z něhož je válec vyroben. Jde o čistě teoretický stav, který v reálném prostředí nemůže nastat.

Znamé hodnoty: t_{in} t_{out} t_1 t_2 t_3 D_1 D_2 D_3

- $t_{in} = 166,2^{\circ}\text{C};$
- $t_{out} = 25^{\circ}\text{C};$
- $\alpha_1 = 10000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}};$
- $\alpha_2 = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}};$
- $\lambda = 47 \frac{\text{W}}{\text{mK}};$
- $D_1 = 1,22\text{m};$
- $D_2 = 1,118\text{m}$

Hledané hodnoty:

- $t_{w-out} = ? [^{\circ}\text{C}]$

Výpočet:

- tepelný tok na 1m délky

$$q = \alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_{w-in})$$

$$q = \alpha_2 \cdot D_2 \cdot (T_{w-out} - T_{out})$$

$$q = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot (T_{w-in} - T_{w-out})$$

- odtud vyjádříme:

$$\alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_{w-in}) = \alpha_2 \cdot D_2 \cdot (T_{w-out} - T_{out})$$

$$\alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_{w-in}) = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot (T_{w-in} - T_{w-out})$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot (T_{w-out} - T_{out}) = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot (T_{w-in} - T_{w-out})$$

- vyjádření teploty na vnitřní stěně válce:

$$\alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_{w-in}) = \alpha_2 \cdot D_2 \cdot (T_{w-out} - T_{out})$$

$$T_{in} - T_{w-in} = \frac{\alpha_2 \cdot D_2}{\alpha_1 \cdot D_1} (T_{w-out} - T_{out})$$

$$\frac{\alpha_2 \cdot D_2}{\alpha_1 \cdot D_1} = A$$

$$T_{w-in} = T_{in} - A(T_{w-out} - T_{out})$$

- výpočet teploty vnějšího povrchu válce:

$$\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D_2}{D_1}} = B$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot (T_{w-out} - T_{out}) = B \cdot (T_{w-in} - T_{w-out})$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{w-out} - \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out} = B \cdot [T_{in} - A(T_{w-out} - T_{out}) - T_{w-out}]$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{w-out} - \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out} = B \cdot [T_{in} - A \cdot T_{w-out} + A \cdot T_{out} - T_{w-out}]$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{w-out} - \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out} = B \cdot T_{in} - AB \cdot T_{w-out} + AB \cdot T_{out} - B \cdot T_{w-out}$$

$$\alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{w-out} + AB \cdot T_{w-out} + B \cdot T_{w-out} = B \cdot T_{in} + AB \cdot T_{out} + \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out}$$

$$T_{w-out}(\alpha_2 \cdot D_2 + AB + B) = B \cdot T_{in} + AB \cdot T_{out} + \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out}$$

$$T_{w-out} = \frac{B \cdot T_{in} + AB \cdot T_{out} + \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out}}{(\alpha_2 \cdot D_2 + AB + B)}$$

$$T_{w-out} = \frac{\frac{2\pi\lambda}{\ln\frac{D_2}{D_1}} \cdot t_{in} + \frac{\alpha_2 \cdot D_2}{\alpha_1 \cdot D_1} \cdot \frac{2\pi\lambda}{\ln\frac{D_2}{D_1}} \cdot T_{out} + \alpha_2 \cdot D_2 \cdot T_{out}}{\left(\alpha_2 \cdot D_2 + \frac{\alpha_2 \cdot D_2}{\alpha_1 \cdot D_1} \cdot \frac{2\pi\lambda}{\ln\frac{D_2}{D_1}} + \frac{2\pi\lambda}{\ln\frac{D_2}{D_1}} \right)} \quad [19]$$

Po dosazení známých hodnot do rovnice [19] získáme teplotu povrchu clupakového válce:

$$T_{w-out} = 438,69K \rightarrow t_{w-out} = 165,54^\circ C$$

Z výsledku plyne, že rozdíl teplot při přestupu tepla v případě, kdy nám izolační vrstvu tvoří pouze plášť válce, činí pouhých 0,66 °C. Tepelný tok, vztažený na jednotku délky q je roven 1714,55 W·m⁻¹.

11.2 Povrchová teplota válce při přenosu tepla stěnou válce a vrstvou kondenzátu

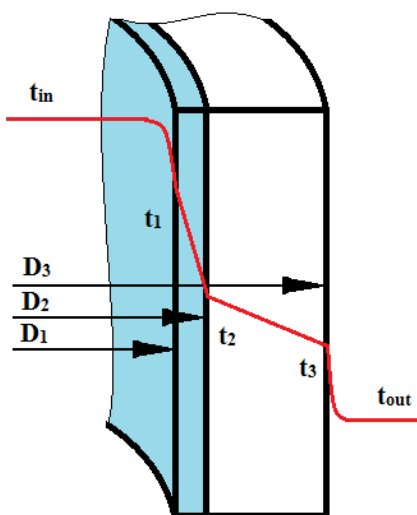
Modelová situace uvedená v předcházející kapitole v reálném stavu nemůže nastat. Chceme-li se reálnému stavu přiblížit, je třeba počítat s dalšími izolačními vrstvami, jimiž teplo přestupuje. Proto následuje výpočet, kdy další izolační vrstvu tvoří prstavec kondenzátu vzniklý při kondenzaci páry a jenž tvoří souvislou vrstvu po vnitřním obvodu válce. V tomto případě počítáme s vrstvou o tloušťce 12 mm, která je shodná s výškou rozrážecích tyčí umístěných ve válci. Tento stav můžeme brát jako ideální reálný stav, kdy ve válci nezůstane po najetí paro-kondenzátního systému žádný vzduch. Podle výpočtů

a měření provedených společností Kadant při studii sušící části PS5 byl určen součinitel přestupu tepla na straně kondenzátu 10000 W/m²K.

Výpočet situace „pára-kondenzát-stěna válce“:

Znamé hodnoty:

- $t_{in} = 166,2^\circ C$; $t_{out} = 25^\circ C$;
- $D_1 = 1,094m$;
- $D_2 = 1,118m$;
- $D_3 = 1,220m$;
- $\alpha_1 = 10000 \frac{W}{m^2K}$; $\alpha_2 = 10 \frac{W}{m^2K}$;
- $\lambda_1 = 0,679 \frac{W}{mK}$; $\lambda_2 = 47 \frac{W}{mK}$;



Obr. 14: Průběh teplot na řezu pláštěm válce s vrstvou kondenzátu na vnitřní stěně

Hledané hodnoty:

- $t_3 = ? \text{ } ^\circ\text{C}$

Výpočet:

- součinitel prostupu tepla na 1 m délky:

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{\alpha_3 \cdot D_3}}$$
$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{10000 \cdot 1,094} + \frac{1}{2 \cdot 0,679} \cdot \ln \frac{1,118}{1,094} + \frac{1}{2 \cdot 47} \cdot \ln \frac{1,22}{1,118} + \frac{1}{10 \cdot 1,22}}$$
$$k_{1m} = 11,44 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

- tepelný tok na 1 m délky:

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$
$$q_{1m} = 11,44 \cdot (439,347 - 298,15)$$
$$q_{1m} = 1614,77 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

- teplota na povrchu válce:

$$q_{1m} = \alpha_2 \cdot D_3 \cdot (T_3 - T_{out})$$
$$T_3 = \frac{q_{1m}}{\alpha_2 \cdot D_3} \cdot T_{out}$$
$$T_3 = 430,51\text{K} \rightarrow t_3 = 157,36^\circ\text{C}$$

Protože je tepelný tok vztažený na 1 m délky válce všemi vrstvami stejný, lze obdobně, jako v případě výpočtu povrchové teploty válce při přenosu tepla pouze stěnou válce, vyjádřit tepelný tok pro každou vrstvu zvlášť a následně úpravou těchto rovnic získat hodnoty jednotlivých teplot na rozhraní vrstev.

$$q_{1m} = \alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_1)$$

$$q_{1m} = \frac{2\pi\lambda_1}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q_{1m} = \frac{2\pi\lambda_2}{\ln \frac{D_3}{D_2}} \cdot (T_2 - T_3)$$

Výsledné teploty mezi vrstvami pak činí:

- teplota kondenzátu na straně páry

$$T_1 = 439,2K \rightarrow t_1 = 166,05^\circ C$$

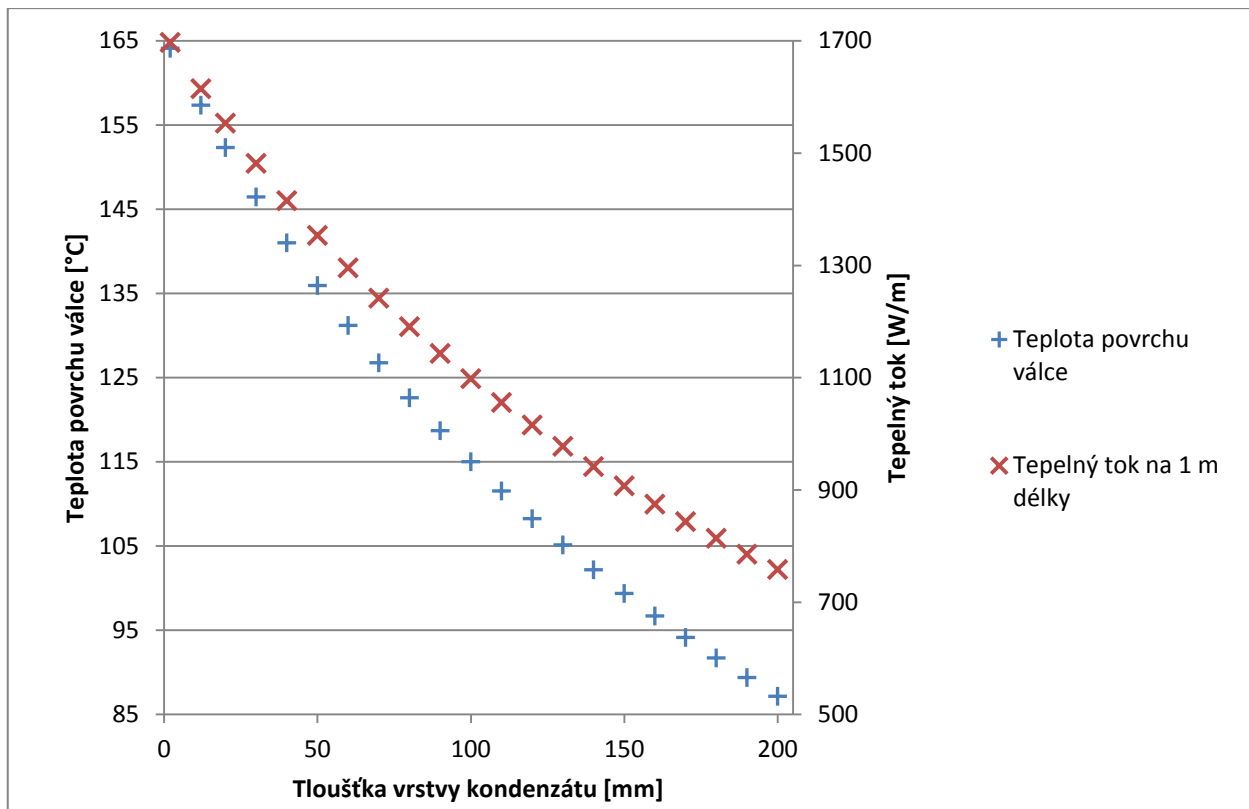
- teplota na vnitřní stěně válce

$$T_2 = 430,99K \rightarrow t_2 = 157,84^\circ C$$

V následující tabulce jsou uvedeny teploty povrchu válce při různé tloušťce kondenzátu, tvořícího prstenec uvnitř clupakového válce. Dále tepelný tok na délku 1m při dané tloušťce vrstvy kondenzátu a jednotlivé teploty na rozhraních. Tato závislost teploty povrchu na množství kondenzátu je dále znázorněna v grafu 3.

$T_{(in)}$	$T_{(out)}$	α_1	α_3	λ_1	λ_2	s	t_1	t_2	t_3	q_1
[°C]	[°C]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/mK]	[W/mK]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m]
166,197	25	10000	10	0,679	47	2	166,04	164,62	164,12	1697,23
166,197	25	10000	10	0,679	47	12	166,05	157,84	157,36	1614,77
166,197	25	10000	10	0,679	47	20	166,05	152,79	152,33	1553,40
166,197	25	10000	10	0,679	47	30	166,06	146,90	146,46	1481,81
166,197	25	10000	10	0,679	47	40	166,06	141,43	141,01	1415,34
166,197	25	10000	10	0,679	47	50	166,06	136,34	135,94	1353,44
166,197	25	10000	10	0,679	47	60	166,07	131,58	131,20	1295,66
166,197	25	10000	10	0,679	47	70	166,07	127,14	126,77	1241,57
166,197	25	10000	10	0,679	47	80	166,07	122,96	122,61	1190,84
166,197	25	10000	10	0,679	47	90	166,08	119,04	118,70	1143,14
166,197	25	10000	10	0,679	47	100	166,08	115,34	115,02	1098,20
166,197	25	10000	10	0,679	47	110	166,08	111,85	111,54	1055,78
166,197	25	10000	10	0,679	47	120	166,08	108,55	108,25	1015,67
166,197	25	10000	10	0,679	47	130	166,08	105,43	105,14	977,67
166,197	25	10000	10	0,679	47	140	166,08	102,46	102,18	941,60
166,197	25	10000	10	0,679	47	150	166,09	99,64	99,37	907,33
166,197	25	10000	10	0,679	47	160	166,09	96,96	96,70	874,70
166,197	25	10000	10	0,679	47	170	166,09	94,40	94,15	843,59
166,197	25	10000	10	0,679	47	180	166,09	91,95	91,71	813,89
166,197	25	10000	10	0,679	47	190	166,09	89,62	89,38	785,49
166,197	25	10000	10	0,679	47	200	166,09	87,38	87,16	758,31

Tab. 3: Výpočet povrchové teploty clupakového válce a tepelný tok vztažený na 1 m délky válce při různé tloušťce vrstvy kondenzátu



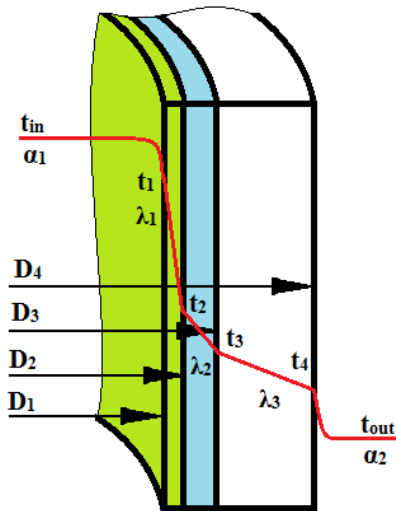
Graf 3: Vliv tloušťky vrstvy kondenzátu na povrchovou teplotu válce a tepelný tok vztahovaný na 1 m délky

11.3 Povrchová teplota válce při přenosu tepla stěnou válce, vrstvou kondenzátu a vrstvou vzduchu

Konečně poslední teoreticky řešenou modelovou situací je prostup tepla skrze složenou válcovou stěnu, jež je tvořena stěnou válce, vrstvou kondenzátu a vrstvou vzduchu. Tento vzduch se dostává do paro-kondenzátního systému během jeho odstavení, kdy při chladnutí dochází k vzniku podtlaku a nasávání vzduchu do systému netěsnostmi.

Pokud následně při nájezdu systému zpět na provozní hodnoty po odstavení stroje nedojde k vytěsnění tohoto inertního plynu, vzniká uvnitř válce další izolační vrstva, jež má za následek zhoršení přestupu tepla a snížení povrchové teploty válce. Zároveň dojde ke vzniku směsi vzduchu a páry, která dle Daltonova zákona dosahuje stále stejného absolutního tlaku 620 kPa, ale skutečný tlak páry je ponížěn o parciální tlak plynu obsažený v této směsi. Teplota, kterou pak tato směs dosahuje je rovna teplotě syté páry při tlaku ponížěném o parciální tlak vzduchu obsaženého ve směsi, tak jak je uvedeno v kapitole 6.

Při následujícím výpočtu je uvažován takový stav uvnitř clupakového válce, kdy vrstva kondenzátu dosahuje tloušťky 12 mm (na výšku rozrážecích tyčí) a uvnitř válce je pára, jež netvoří se vzduchem směs. Vzduch uvnitř válce tvoří „pouze“ další vrstvu, skrze niž musí teplo přestoupit. Výpočet je proveden pro různě silnou vrstvu vzduchu a závislost povrchové teploty válce na tloušťce této vrstvy je opět vynesena v grafu.



Obr. 15: Průběh teplot na řezu pláštěm válce s vrstvou vzduchu a kondenzátu uvnitř válce

Znamé hodnoty:

- $t_{in} = 166,2^{\circ}\text{C}$;
- $t_{out} = 25^{\circ}\text{C}$;
- $D_1 = 0,860 \div 1,092\text{m}$;
- $D_2 = 1,094\text{m}$;
- $D_3 = 1,118\text{m}$;
- $D_4 = 1,220\text{m}$;

- $\alpha_1 = 10 \div 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$; $\alpha_2 = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$;
- $\lambda_1 = 0,0358 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$; $\lambda_2 = 0,679 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$; $\lambda_3 = 47 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$;

Hledaná hodnota:

- povrchová teplota clupakového válce:

$$t_4 = ? \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Vztahy použité při výpočtu:

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_4}}$$

$$q_{1m} = \alpha_1 \cdot D_1 \cdot (T_{in} - T_1)$$

$$q_{1m} = \frac{2\pi\lambda_1}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q_{1m} = \frac{2\pi\lambda_2}{\ln \frac{D_3}{D_2}} \cdot (T_2 - T_3)$$

$$q_{1m} = \frac{2\pi\lambda_3}{\ln \frac{D_4}{D_3}} \cdot (T_3 - T_4)$$

$$q_{1m} = \alpha_2 \cdot D_4 \cdot (T_4 - T_{out})$$

Hodnota součinitele přestupu tepla při ohřívání vzduchu uváděná v literatuře se pohybuje v rozmezí od 10 do 100 W/(m²K). Proto byl následující výpočet proveden pro různé hodnoty, jimiž jsou 10; 30; 50; 70 a 100 W/(m²K). Výsledky při daných součinitelích a tloušťce vrstvy vzduchu jsou uvedeny v následujících tabulkách. Pro přiblížení k reálným podmínkám by bylo třeba provést reálné měření na testovacím zařízení podobné konfigurace v laboratorních podmínkách.

T(in)	T(out)	s	t1	t2	t3	t4	k	q1m
[K]	[K]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/mK]	[W/m]
439,35	298,15	0,01	152,83	152,71	145,28	144,84	10,36	1462,10
439,35	298,15	0,05	152,88	152,28	144,87	144,44	10,32	1457,18
439,35	298,15	0,10	152,93	151,75	144,37	143,94	10,28	1451,08
439,35	298,15	0,20	153,04	150,70	143,38	142,95	10,19	1439,03
439,35	298,15	0,30	153,14	149,66	142,40	141,98	10,11	1427,18
439,35	298,15	0,40	153,25	148,65	141,44	141,03	10,03	1415,52
439,35	298,15	0,50	153,35	147,64	140,50	140,09	9,94	1404,05
439,35	298,15	1,00	153,84	142,86	136,00	135,60	9,56	1349,34
439,35	298,15	5,00	156,72	114,76	109,54	109,23	7,28	1027,65
439,35	298,15	10,00	158,84	94,02	90,00	89,77	5,60	790,20
439,35	298,15	15,00	160,17	80,97	77,71	77,52	4,54	640,75
439,35	298,15	20,00	161,09	72,00	69,26	69,10	3,81	538,04
439,35	298,15	25,00	161,76	65,45	63,10	62,96	3,28	463,09
439,35	298,15	30,00	162,27	60,46	58,40	58,28	2,88	405,99
439,35	298,15	35,00	162,67	56,54	54,70	54,59	2,56	361,04
439,35	298,15	40,00	162,99	53,37	51,71	51,62	2,30	324,74
439,35	298,15	45,00	163,26	50,75	49,25	49,16	2,09	294,80
439,35	298,15	50,00	163,48	48,56	47,18	47,11	1,91	269,68
439,35	298,15	60,00	163,84	45,08	43,91	43,85	1,63	229,91
439,35	298,15	70,00	164,10	42,45	41,44	41,38	1,42	199,83
439,35	298,15	80,00	164,31	40,40	39,50	39,45	1,25	176,28
439,35	298,15	90,00	164,48	38,74	37,94	37,90	1,11	157,33
439,35	298,15	100,00	164,61	37,38	36,66	36,62	1,00	141,75
439,35	298,15	120,00	164,82	35,28	34,68	34,64	0,83	117,65
439,35	298,15	140,00	164,97	33,72	33,21	33,19	0,71	99,86
439,35	298,15	160,00	165,08	32,53	32,09	32,06	0,61	86,17
439,35	298,15	180,00	165,17	31,58	31,19	31,17	0,53	75,30

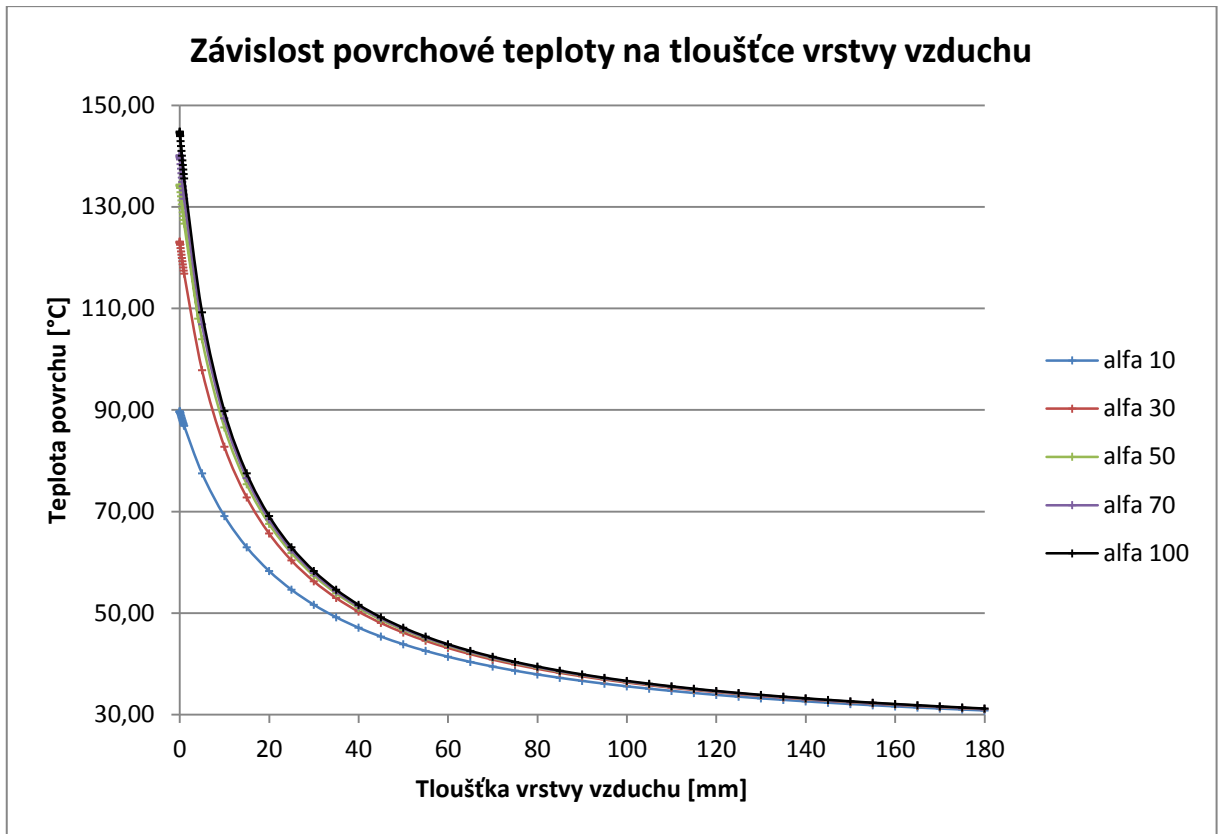
Tab. 4: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=100$ W/(m².K)

T(in)	T(out)	s	t1	t2	t3	t4	k	q1m
[K]	[K]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/mK]	[W/m]
439,35	298,15	0,01	141,78	141,67	134,88	134,48	9,46	1335,67
439,35	298,15	0,05	141,85	141,31	134,54	134,14	9,43	1331,56
439,35	298,15	0,10	141,94	140,86	134,12	133,73	9,39	1326,45
439,35	298,15	0,20	142,12	139,98	133,29	132,90	9,32	1316,36
439,35	298,15	0,30	142,30	139,11	132,47	132,08	9,25	1306,41
439,35	298,15	0,40	142,48	138,26	131,66	131,28	9,18	1296,62
439,35	298,15	0,50	142,65	137,42	130,87	130,49	9,11	1286,96
439,35	298,15	1,00	143,47	133,38	127,07	126,70	8,79	1240,76
439,35	298,15	5,00	148,43	109,12	104,22	103,93	6,82	962,99
439,35	298,15	10,00	152,21	90,60	86,78	86,56	5,32	751,06
439,35	298,15	15,00	154,65	78,68	75,55	75,37	4,35	614,54
439,35	298,15	20,00	156,34	70,36	67,72	67,56	3,68	519,26
439,35	298,15	30,00	158,56	59,50	57,49	57,38	2,80	395,01
439,35	298,15	40,00	159,93	52,74	51,12	51,03	2,25	317,53
439,35	298,15	50,00	160,87	48,11	46,77	46,69	1,87	264,60
439,35	298,15	60,00	161,55	44,75	43,60	43,54	1,60	226,13
439,35	298,15	70,00	162,07	42,20	41,20	41,14	1,39	196,91
439,35	298,15	80,00	162,47	40,19	39,31	39,26	1,23	173,95
439,35	298,15	90,00	162,80	38,58	37,79	37,74	1,10	155,43
439,35	298,15	100,00	163,06	37,24	36,53	36,49	0,99	140,18
439,35	298,15	120,00	163,47	35,18	34,59	34,55	0,83	116,52
439,35	298,15	140,00	163,76	33,65	33,14	33,11	0,70	99,00
439,35	298,15	160,00	163,99	32,47	32,03	32,01	0,61	85,50
439,35	298,15	180,00	164,16	31,53	31,15	31,13	0,53	74,75

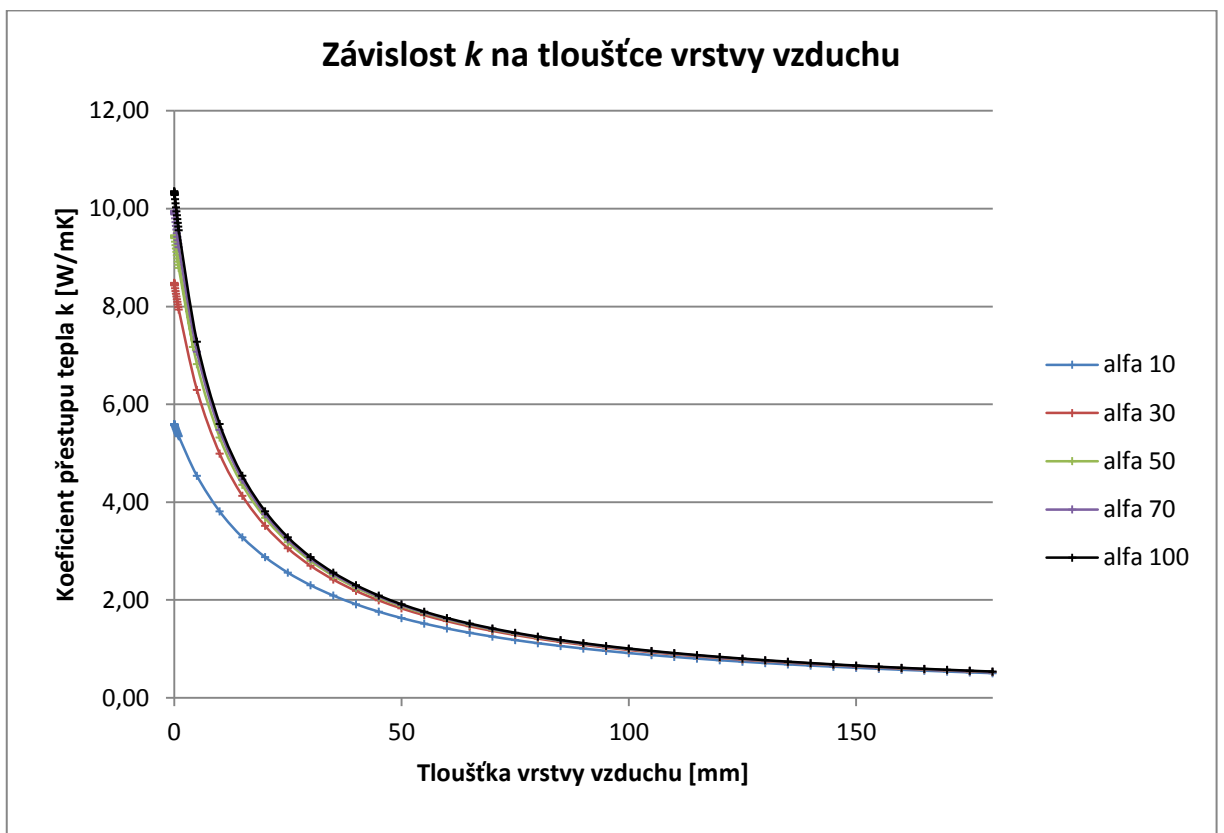
Tab. 5: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=50 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

T(in)	T(out)	s	t1	t2	t3	t4	k	q1m
[K]	[K]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/mK]	[W/m]
439,35	298,15	0,01	94,03	93,96	89,95	89,71	5,59	789,52
439,35	298,15	0,05	94,16	93,84	89,83	89,59	5,58	788,05
439,35	298,15	0,10	94,32	93,68	89,68	89,45	5,57	786,23
439,35	298,15	0,20	94,63	93,36	89,38	89,15	5,54	782,62
439,35	298,15	0,30	94,95	93,05	89,09	88,86	5,52	779,03
439,35	298,15	0,40	95,26	92,74	88,79	88,56	5,49	775,48
439,35	298,15	0,50	95,57	92,43	88,50	88,28	5,47	771,96
439,35	298,15	1,00	97,07	90,93	87,09	86,87	5,35	754,82
439,35	298,15	5,00	107,10	80,95	77,70	77,51	4,54	640,57
439,35	298,15	10,00	116,11	71,99	69,25	69,09	3,81	537,92
439,35	298,15	15,00	122,68	65,44	63,09	62,95	3,28	463,02
439,35	298,15	20,00	127,68	60,46	58,39	58,27	2,88	405,95
439,35	298,15	30,00	134,79	53,36	51,71	51,62	2,30	324,72
439,35	298,15	40,00	139,60	48,56	47,19	47,11	1,91	269,68
439,35	298,15	50,00	143,07	45,08	43,91	43,85	1,63	229,92
439,35	298,15	60,00	145,68	42,46	41,44	41,38	1,42	199,84
439,35	298,15	70,00	147,72	40,40	39,50	39,45	1,25	176,29
439,35	298,15	80,00	149,35	38,74	37,94	37,90	1,11	157,35
439,35	298,15	90,00	150,69	37,38	36,66	36,62	1,00	141,77
439,35	298,15	100,00	151,80	36,25	35,59	35,55	0,91	128,74
439,35	298,15	120,00	153,53	34,45	33,90	33,87	0,77	108,16
439,35	298,15	140,00	154,82	33,09	32,62	32,59	0,66	92,62
439,35	298,15	160,00	155,80	32,03	31,62	31,60	0,57	80,46
439,35	298,15	180,00	156,57	31,17	30,81	30,79	0,50	70,68

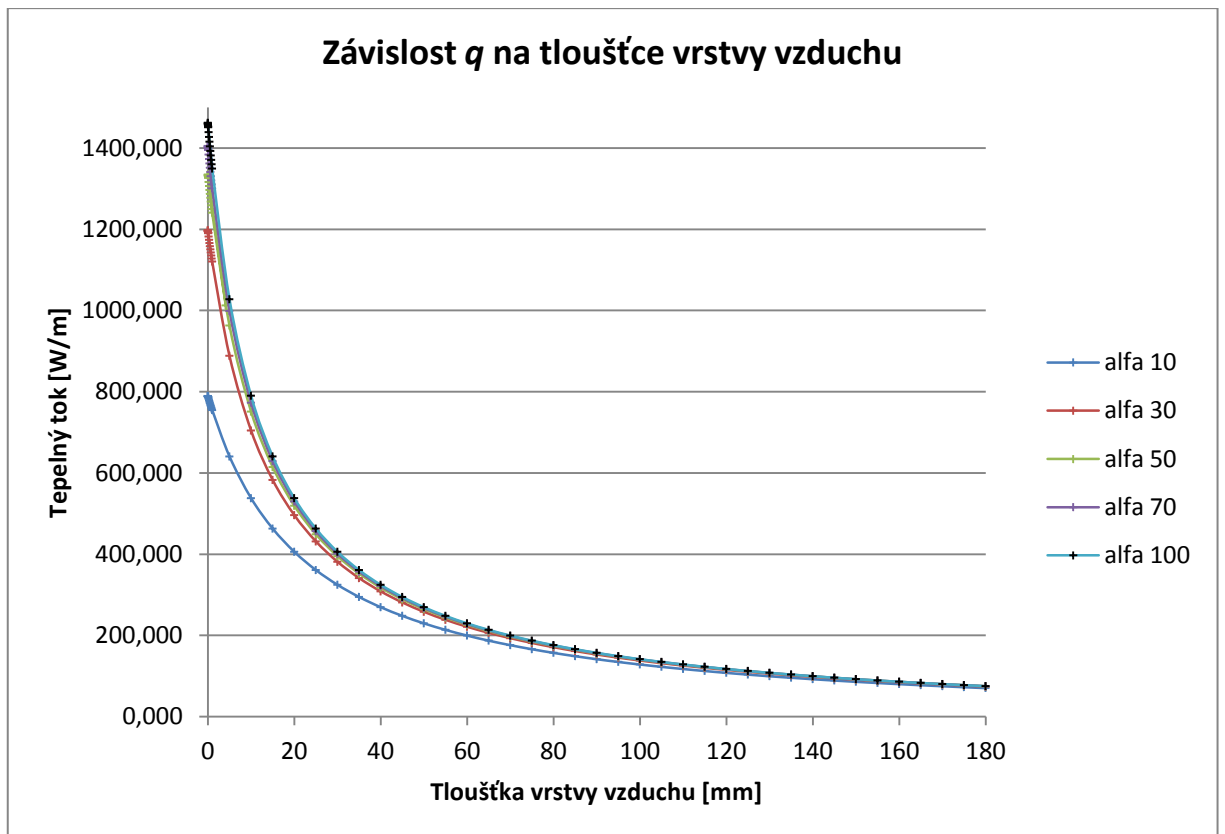
Tab. 6: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$



Graf 4: Závislost teploty povrchu válce na tloušťce vrstvy vzduchu uvnitř válce při různých hodnotách α_1



Graf 5: Závislost celkového koeficientu prostupu tepla na tloušťce vrstvy vzduchu při různých hodnotách α_1



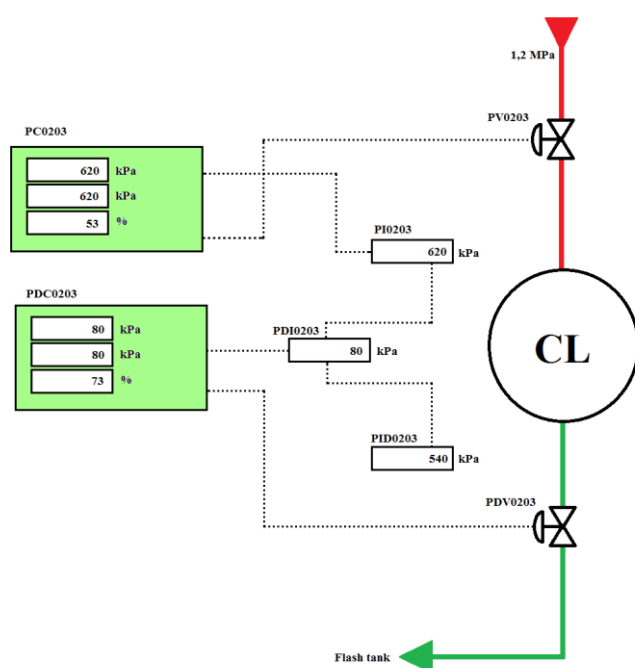
Graf 6: Závislost tepelného toku vztaženého na 1 m délky válce na tloušťce vrstvy vzduchu při různých hodnotách α_1

Výsledky získané z teoretických výpočtů budou v následujících kapitolách porovnány s měřeními reálných teplot povrchu clupakového válce před a po provedení investičních akcí na konci roku 2015.

12 Pilotní projekt odvzdušnění clupakového válce PS5

Z provedených teoretických výpočtů v předcházejících kapitolách je zřejmý negativní vliv přítomnosti vzduchu v paro-kondenzátním systému během jeho provozu. Dochází ke značnému poklesu výkonu sušící části a růstu spotřeby topného média.

Během hlavní odstávky v říjnu roku 2015 byl, mimo jiné, zahájen pilotní projekt odvzdušnění clupakového válce, jehož cílem je poukázat na možnosti úspor v případě, že bude systém po každém odstavení správně najet a dojde k potřebnému vytlačení veškerého vzduchu z paro-kondenzátního systému. Důvodem k výběru clupakového válce je jeho relativně dobrá přístupnost pro následná měření a zároveň jde o jediný válec, pro nějž je k jeho ohřátí využito páry o tlaku 1,2 MPa. Pára je přiváděna skrze ventil, jehož otevření je regulováno dle zadané hodnoty vstupního tlaku páry v řídicím systému. Na výstupu směsi páry a kondenzátu je umístěn také automatický ventil, jenž je regulován zadáním požadované hodnoty diferenčního tlaku mezi vstupem a výstupem z válce.

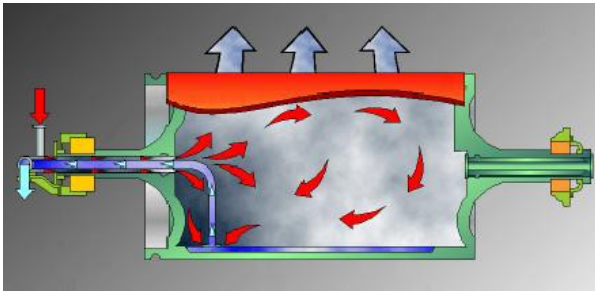


Obr. 16: Regulační obvod vytápění clupakového válce

sbíhavé místo. Proto je nezbytné, aby teplotní profil po celé délce válce byl rovnoměrný a bylo dosaženo potřebné teploty k odpaření vody ze směsi dříve, než dojde ke kontaktu silikonu s papírem. Nedostatečné a nerovnoměrné odpaření vody ze směsi by mělo za následek zhoršení příčného vlhkostního profilu v pásu papíru.

Schéma zapojení clupakového válce je patrné na obrázku 16. Na tento válec je pomocí rozprašovacích stříček nanášena směs vody a silikonu, jenž má zajistit hladký průchod papíru mezi válcem a gumovou kurtou, jež je k válci přitlačována zatěžovací tyčí. Při nástřiku na válec dojde k odpaření vody z nanášené směsi a vytvoří se slabá vrstva silikonu, jenž společně s hladkým povrchem válce tvořeným slabou vrstvou (0,165 mm) chromového nástřiku zajistí jeho průchod skrze toto

Válec je vytápěn parou o tlaku 1,2 MPa. Maximální tlak při výrobě mikrokrepovaného papíru však činí maximálně 650 kPa. Do válce je přiváděn skrze parní hlavu umístěnou



Obr. 17: Systém Duplex [S1]

ze strany obsluhy stroje. Na stejném místě je umístěn i odvod kondenzátu z válce. Systém, při němž je přiváděna pára a odváděn kondenzát z jedné strany válce se nazývá Duplex. Aby byl zajištěn odvod vzduchu z válce při najetí paro-kondenzátního systému po odstávce,

je doporučeno zařadit do paro-kondenzátního systému vývěvu. V případě stroje PS5 je vývěva umístěna za vakuem tankem a má tak zajistit podtlak a odvod veškerého vzduchu z celého paro-kondenzátního systému. Výstup kondenzátu z clupakového válce je veden do flash tanku předcházející právě vakuem tanku.

Odvod kondenzátu z válce je zajištěn dvěma rotačními sifony, které jsou umístěny v 1/3, respektive ve 2/3 délky válce. Jak je patrné z obrázku 18 po celé délce clupakového válce jsou umístěny rozrážecí tyče, jejichž úkolem je rovnoměrné rozložení kondenzátu po vnitřním obvodu válce. Výška těchto tyčí je 12 mm, tedy je počítáno i se stejně širokou vrstvou kondenzátu.

Pro zajištění správného odvodu kondenzátu z vnitřního prostoru válce je doporučená hodnota diferenčního tlaku mezi vstupem páry do válce a výstupem kondenzátu z válce přibližně 100 kPa pro rychlost stroje 950 m/min. Oproti původní konfiguraci, pro kterou byl systém navržen, jde o nárůst rychlosti o 300 m/min a změnu doporučeného diferenčního tlaku

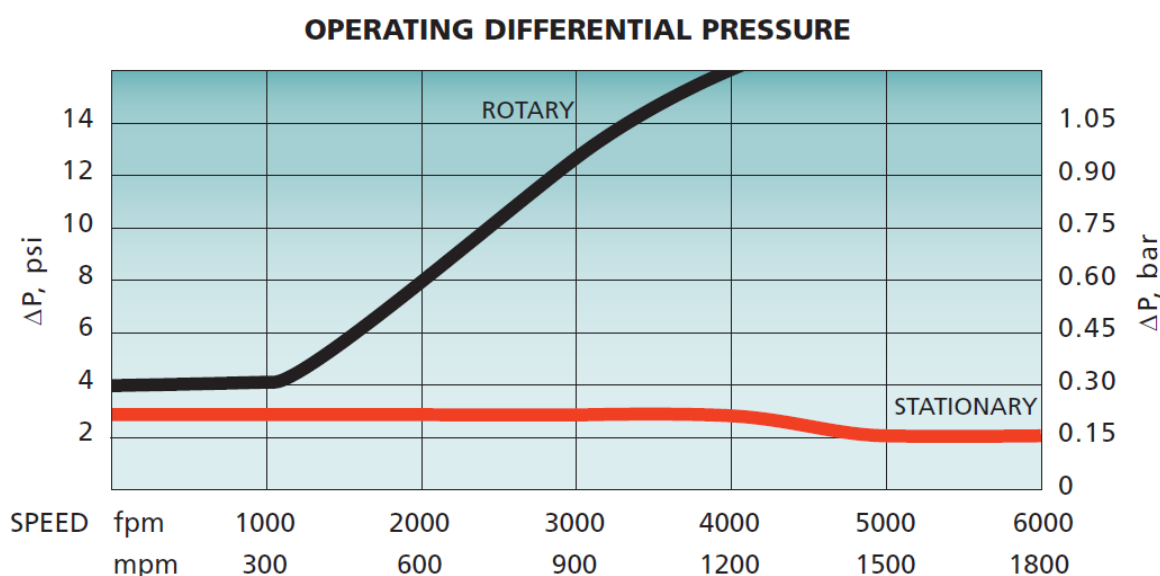


Obr. 18: Pohled do otevřeného clupakového válce [S5]

o 35 kPa. To má za následek přetlakování flash tanku, do něhož je směs kondenzátu a páry odváděna a následně i celého paro-kondenzátního systému. V příloženém grafu společnosti Kadant jsou doporučeny typy odvaděčů kondenzátu v závislosti na rychlosti stroje.

Základní rozměry clupakového válce byly uvedeny v kapitole 10.1, stejně i materiál použitý při jeho výrobě.

V průběhu odstávek během roku 2015 došlo k několika změnám a úpravám na přívodu páry a odvodu kondenzátu z clupakového válce. Na výstupu kondenzátu z válce byla instalována odbočka směřující k ejektoru, jehož úkolem je vytvoření podtlaku při nájezdu systému a odvod vzduchu obsaženého v clupakovém válci po odstavení stroje. Během hlavní odstávky došlo k výměně válce a zároveň byly nahrazeny naběráky (botičky) sifonů za novější typ, u kterého je k odvodu kondenzátu potřeba nižšího diferenčního tlaku, než u dosud používaných.



Graf 7: Doporučené hodnoty diferenčního tlaku při použití stacionárního a rotačního odvaděče kondenzátu firmou Kadant [I4]

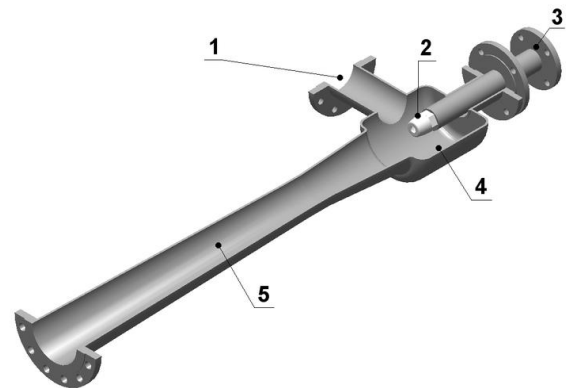
12.1 Ejektor

Jak bylo zmíněno v předcházející kapitole, k odsátí vzduchu a udržení podtlaku v paro-kondenzátním systému je přes vakuum tank připojena vývěva. Vzhledem k přetlakování systému se výkon vývěvy snižuje a pro danou konfiguraci je nedostatečný. Proto součástí pilotního projektu bylo zařazení ejektoru do systému odvodu kondenzátu z clupakového válce, aby bylo zajištěno dostatečné odsátí vzduchu z válce po odstavení stroje.

Ejektorem označujeme proudové čerpadlo, jež se skládá z těchto hlavních konstrukčních částí: vstupní kanál a dýza (tryska) hnací látky, vstupní kanál hnané látky,

směšovací komoru a difuzor. Principem ejektoru je tvorba podtlaku, který vzniká při průchodu hnací látky tryskou, kde dojde k přeměně tlakové energie na energii kinetickou. Vzniklým podtlakem dojde k nasátí čerpaného média, které se smíchá s hnací látkou a získá její rychlost. Směs vstupuje skrze směšovací komoru do difuzoru, kde se zvýší její tlak na úkor její rychlosti.

Výhodami proudového čerpadla je bezúdržbový provoz, jenž plyne z absence pohyblivých částí v tomto zařízení. Zároveň pokud je čerpadlo správně konstrukčně provedeno a byly zvoleny správné materiály, je jeho životnost prakticky neomezená. Protože v čerpadle nejsou žádné pohyblivé části, nedochází ani k vibracím, které by negativně mohly ovlivňovat provoz systému.



Obr. 19: Skladba ejektoru: 1- vstupní kanál hnací látky, 2 - tryska, 3 - vstupní kanál hnací látky, 4 - směšovací komora, 5 - difuzor [15]

12.2 Postup měření povrchové teploty clupakového válce

Na rozdíl od ostatních sušících válců je clupakový válec přístupný z obslužné lávky a je zde možnost přímého měření pomocí kontaktního teploměru. V řídicím systému je vytvořen obvod, dle kterého by měl být řízen vstupní tlak páry do clupakového válce v automatickém režimu, avšak pro jeho nedokonalost není využíván. Teplota je měřena pouze v jednom místě a to pomocí bezkontaktního teploměru. Vzhledem k lesklému povrchu válce nelze infračervené čidlo teploměru použít, aniž by bylo užito složitých korekcí na emisivitu povrchu. Při každém zprovoznění systému došlo po určité době k takovým odchýlkám v měření mezi kontaktním teploměrem a infra měřením, že byl systém odstaven a hodnota tlaku vstupující páry byla zadána v manuálním režimu operátorem.

Měření pro zpracování výsledků v této diplomové práci probíhala při plynulém provozu stroje, kdy výsledným produktem byl mikrokrepaný papír o plošné hmotnosti 80 g/m^2 . Měření byla opakována v rozmezí 15-20 minut. První měření proběhlo před instalací ejektoru určeného k odsátí vzduchu z válce, druhé pak po njetí systému s ejektorem.

Bylo určeno celkem 14 bodů po délce válce tak, že první a poslední bod odpovídal pozici kraje listu papíru. V případě měření bez ejektoru bylo provedeno celkem 5 sad měření. Po instalaci ejektoru bylo provedeno měření šestkrát. Důvodem opakovaných měření bylo vyloučení chyb, které mohly během měření vzniknout.

K měření bylo použito kontaktního teploměru ALMEMO 2490-1L, jenž bude popsán v následující kapitole. Nezbytné bylo zároveň použití ochranných pomůcek, jimiž byly rukavice určené pro práci s teplými předměty a ochranný oděv. Místo, z něhož bylo měření prováděno, můžete vidět na následujícím obrázku.



Obr. 20: Místo měření povrchové teploty válce

12.3 Měřicí přístroj ALMEMO 2490-1L

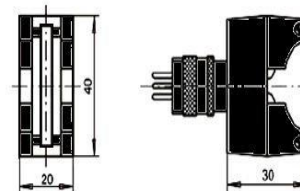
K měření povrchové teploty válce bylo použito přístroje ALMEMO 2490-1L, jehož výrobcem je německá společnost Ahlborn Meßtechnik GmbH.



Jedná se o univerzální měřicí přístroj, v jehož horní části se nachází jeden vstup pro připojení měřícího čidla. Po připojení snímače dojde k zobrazení měřícího rozsahu a měřené hodnoty příslušné veličiny. Po každé výměně snímače není potřeba nové nastavení přístroje. Přístroj je

Obr. 21: ALMEMO 2490-1L [I6] schopen ukládat ve své paměti až 100 naměřených hodnot, které je možné kdykoliv vyvolat z paměti a zobrazit na displeji. Napájení přístroje je zajištěno třemi kusy alkalických baterií. Technický list přístroje je připojen na konci diplomové práce.

K přístroji bylo připojeno dotykové teplotní čidlo FT9307TG s termopáskem. Jedná se o termočlánek NiCr-Ni, jehož měřicí rozsah se pohybuje v rozmezí od -50°C do $+220^{\circ}\text{C}$. Měřicím elementem je pružný plíšek o šířce 4 mm, typ tohoto čidla je vhodný pro měření konvexních a konkávních povrchů.



Obr. 22: Čidlo FT9307TG [I6]

12.4 Výsledky měření a jejich zpracování

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty získané při jednotlivých měřeních prováděných během plynulého provozu stroje. Požadovaná hodnota tlaku ve válci byla 620 kPa. Rychlost stroje v případě měření teploty válce, kdy nebylo pro odvodu vzduchu použito ejektoru, činila 930 m/min. Rychlost během druhého měření byla 900 m/min. Hodnota diferenčního tlaku pro první případ byla 60 kPa, respektive 80 kPa v případě druhého měření.

Rozdíl rychlosti 30 m/min by neměl ovlivnit výsledky měření. Důležitý je požadovaný tlak páry ve válci, pro nějž je v parních tabulkách jasně definována teplota. Ta odpovídá hodnotě $166,197^{\circ}\text{C}$ a při teoretických výpočtech byla použita pro zjištění předpokládané

teploty povrchu válce. Teploty získané během měření poté porovnáme s teoretickým výpočtem a odhadneme případné množství vzduchu obsažené uvnitř válce.

Číslo měření	Teploty [°C]													
	Strana obsluhy							Strana pohonu						
I	105	104	105	100	106	101	103	106	89	90	104	101	93	91
II	121	125	126	125	121	124	112	100	117	93	116	115	113	109
III	118	124	121	114	125	116	122	119	117	120	119	107	109	110
IV	128	126	128	126	121	122	122	119	116	116	122	116	119	111
V	130	123	126	124	117	116	113	105	105	111	119	107	117	110

Tab. 7: Naměřené hodnoty při provozu po najetí systému bez ejektoru

Tlak na vstupu:	620	kPa
Tlak na výstupu:	560	kPa
Diferenční tlak:	60	kPa
Rychlost stroje:	930	mpm

Tab. 8: Parametry provozu stroje při měření

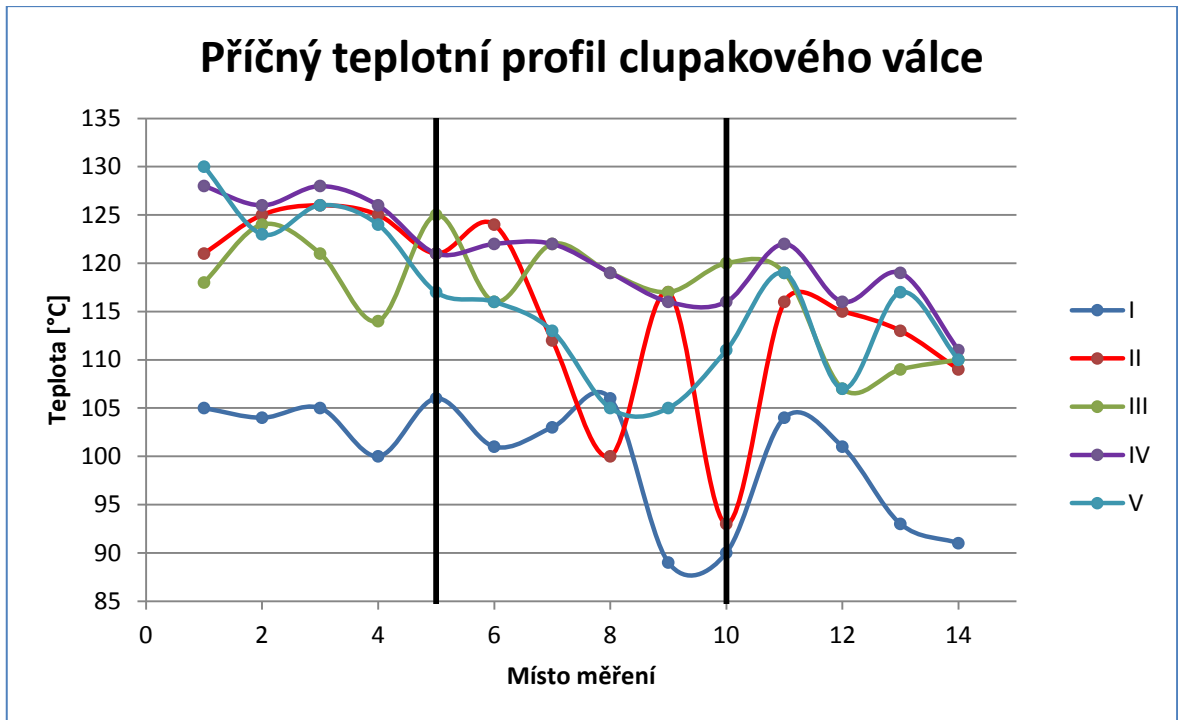
Číslo měření	Teploty [°C]													
	Strana obsluhy							Strana pohonu						
I	119	114	117	118	110	97	98	105	109	114	111	114	95	102
II	110	119	116	109	117	110	114	97	100	114	99	109	98	100
III	119	110	114	105	107	110	106	109	100	100	111	114	98	105
IV	107	112	114	106	104	108	104	105	100	107	115	120	98	109
V	120	112	113	107	105	109	101	104	99	109	110	106	98	106
VI	125	116	112	106	107	111	103	102	105	105	115	108	98	105

Tab. 9: Naměřené hodnoty při provozu po najetí systému s ejektorem

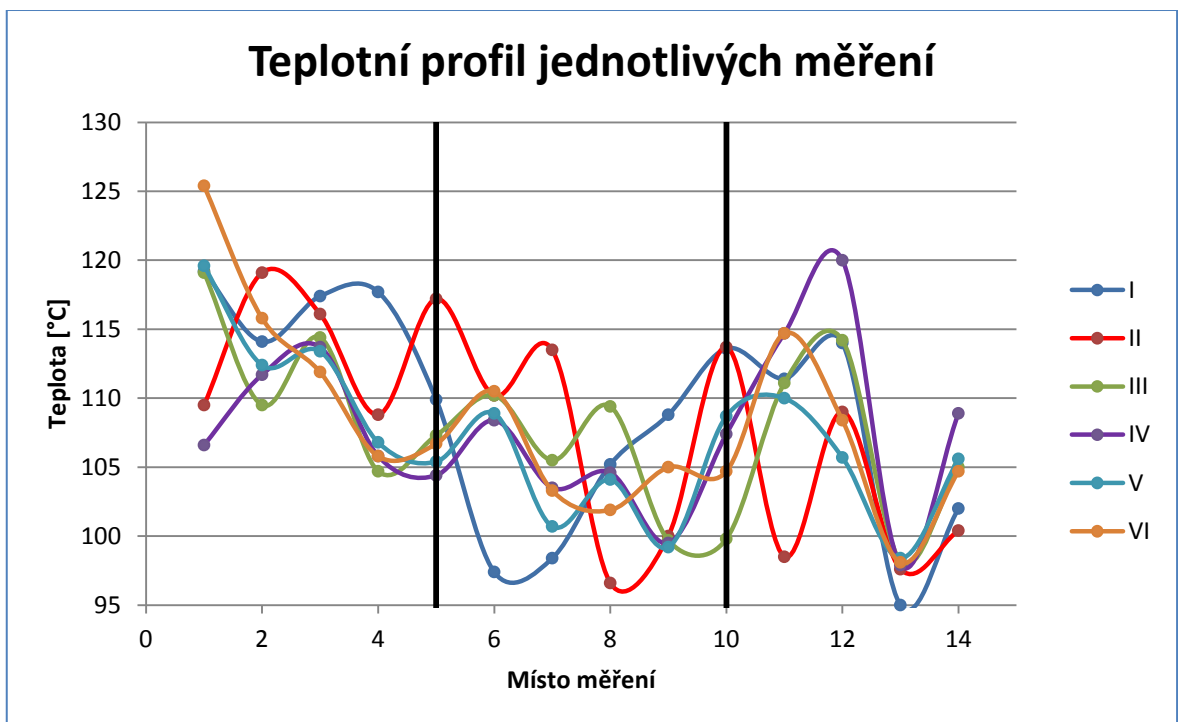
Tlak na vstupu:	620	kPa
Tlak na výstupu:	540	kPa
Diferenční tlak:	80	kPa
Rychlost stroje:	900	mpm

Tab. 10: Parametry provozu stroje při měření

Následně byly vypočítány průměrné hodnoty teplot v jednotlivých místech měření a zároveň průměrná hodnota teploty povrchu válce. Teplotní profily clupakového válce během jednotlivých měření, stejně jako profil průměrných teplot, jsou graficky znázorněny v uvedených grafech.



Graf 8: Teplotní profil napříč válcem před instalací ejektoru

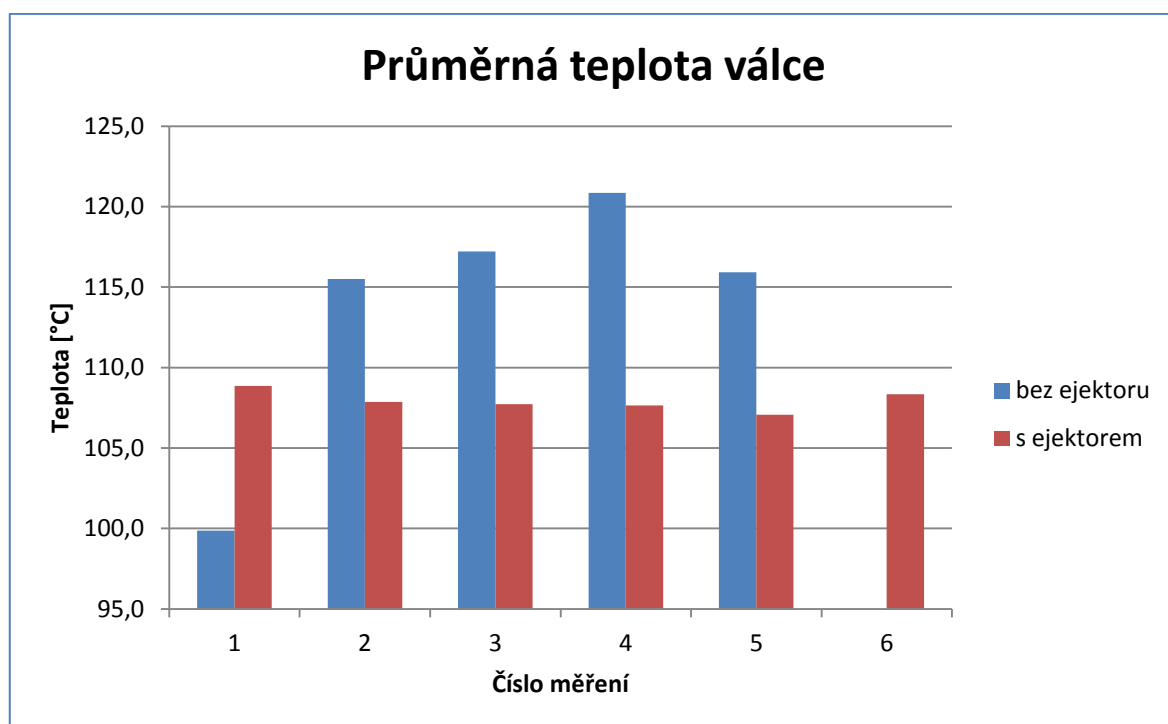


Graf 9: Teplotní profil napříč válcem po instalaci ejektoru

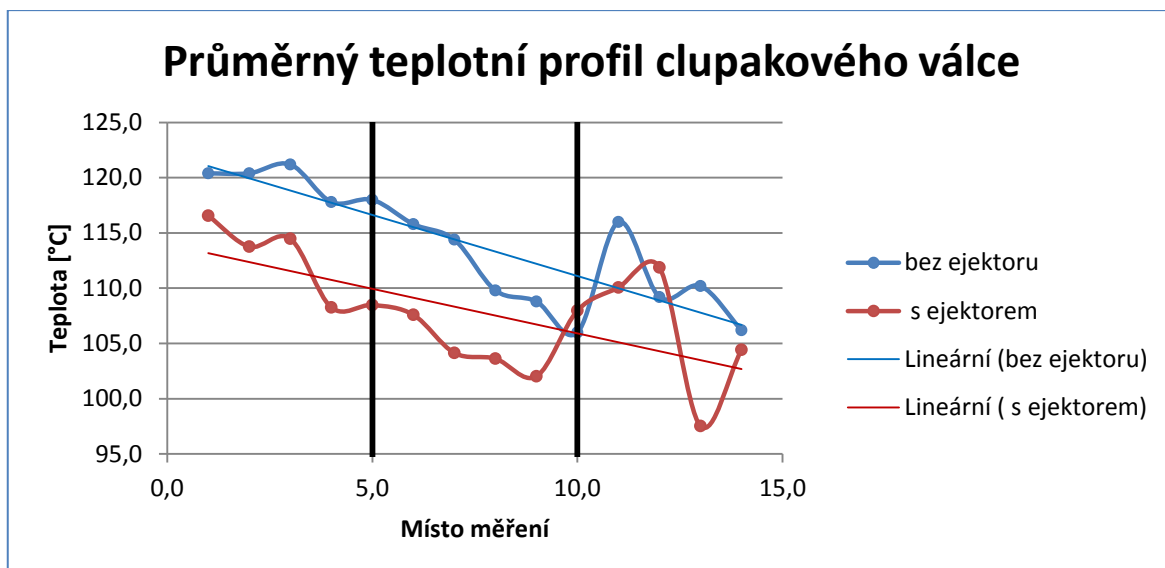
V tabulce 10 jsou uvedeny vypočtené průměrné hodnoty teplot v příčném profilu před i po instalaci ejektoru. Zároveň jsou zde uvedeny celkové průměrné teploty. Vše je opět vyneseno v grafech.

	Příčný teplotní profil válce													
	Teplota [°C]													
	Strana obsluhy							Strana pohonu						
Průměrná teplota bez ejektoru	120,4	120,4	121,2	117,8	118,0	115,8	114,4	109,8	108,8	106,0	116,0	109,2	110,2	106,2
Průměrná teplota s ejektorem	116,6	113,8	114,5	108,3	108,5	107,6	104,2	103,6	102,0	108,0	110,1	111,9	97,5	104,4
	Číslo měření	I	II	III	IV	V	VI							
Průměrná teplota válce	bez ejektoru	99,9	115,5	117,2	120,9	115,9	-							
	s ejektorem	108,9	107,9	107,7	107,7	107,1	108,4							

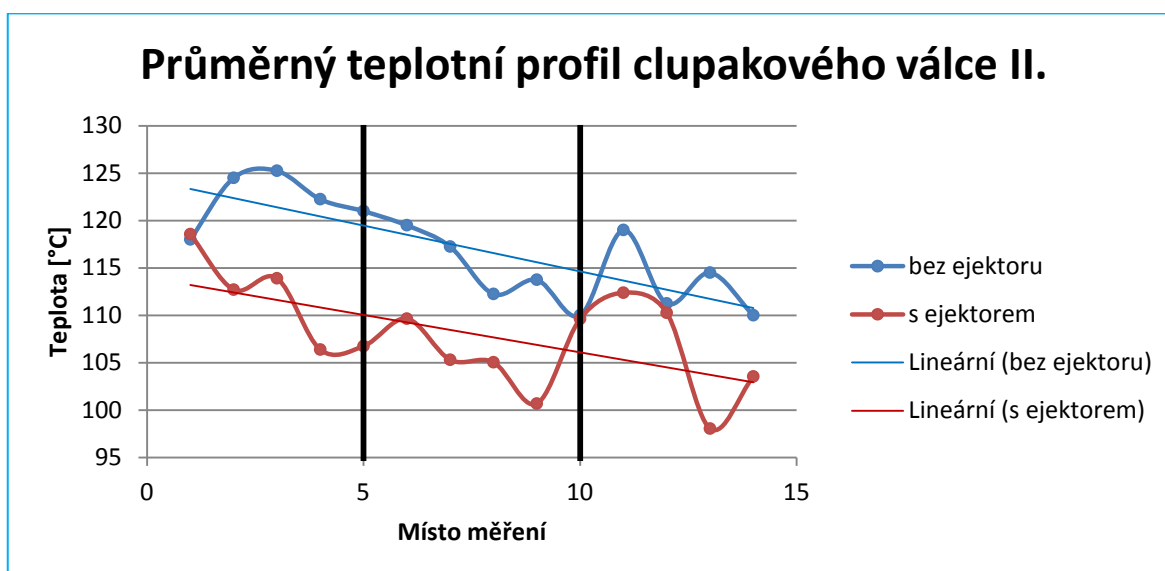
Tab. 11: Průměrné teploty v příčném profilu a celková průměrná teplota válce pro jednotlivá měření



Graf 10: Průměrná teplota válce při jednotlivých měřeních



Graf 11: Teplotní profil clupakového válce - průměrné teploty v bodě měření



Graf 12: Teplotní profil clupakového válce - průměrné teploty v bodě měření po vyloučení teploty s nejvyšší relativní chybou

12.5 Rozbor dat získaných při měření

Podle provedeného teoretického výpočtu v kapitole 11.2 by se měla povrchová teplota, v případě dokonalého odsátí vzduchu ze systému a při rovnoměrném rozložení kondenzátu do vrstvy o tloušťce 12 mm po vnitřním obvodu válce, pohybovat okolo hodnoty 157,4 °C. Během měření bylo zjištěno, jak je patrné z hodnot a grafických znázornění, že teplotní profil po celé šíři válce je značně nerovnoměrný a průměrná hodnota povrchové teploty ani zdaleka nedosahuje předpokládané teploty z výpočtu.

Nejvyšší naměřenou průměrnou teplotou během provozu byla hodnota 120,9 °C, což je o celých 36,5 °C teplota nižší, než předpokládaná teplota z výpočtu. Důvodů proč tomu tak je může být několik.

Především může být teplota ovlivněna tloušťkou vrstvy kondenzátu uvnitř clupakového válce. Z výpočtu ovšem víme, že i v případě kdy by tloušťka vrstvy dosahovala 100 mm (za běžného provozu nereálné), pohybovala by se teplota stále okolo hodnoty 115 °C.

Další neznámou je obsah vzduchu v systému a jeho chování. Budeme-li uvažovat, že vzduch uvnitř válce tvoří, stejně jako kondenzát, rovnoměrný prstenec po jeho vnitřním obvodu, musela by se tloušťka této vrstvy pohybovat v rozmezí 1 až 5 mm. Pak by se povrchová teplota vypočítaná blížila hodnotám teplot měřených pomocí dotykového teploměru. Proto lze předpokládat, že po vnitřním obvodu válce vzniká, kromě vrstvy kondenzátu, slabá vrstva vzduchu a zbylý vzduch uvnitř systému tvoří s párou paro-vzdušnou směs, jejíž absolutní tlak je 620 kPa, ale parciální tlak páry v této směsi je výrazně nižší. Výpočet teoretické hodnoty tohoto parciálního tlaku bude proveden v následující kapitole.

Důvodem k instalaci nového typu naběráku u rotačních sifonů a ejektoru do systému odvodu kondenzátu bylo zlepšení příčného teplotního profilu clupakového válce. Jak můžete vidět v grafu číslo 20, byly rozdíly při jednotlivých měřeních značné. Ať už mezi jednotlivými pozicemi, tak mezi jednotlivými měřeními. Přesto je u všech měření patrný pokles teploty od strany obsluhy, kde je umístěna parní hlava, směrem ke straně pohonu. Přímkou rovnoběžnou s osou y a umístěnou do bodu měření číslo 5 a 10 představují předpokládanou pozici rotačního sifonu uvnitř válce. Zatímco pokles teploty směrem k prvnímu z naběráků lze označit jako plynulý, v případě druhého naběráku a jednotlivých měření jsou patrné značné rozdíly. Tento efekt je ještě více patrný v grafech číslo 11 a 12, kdy v bodě měření č. 11 je skokový rozdíl teplot oproti hodnotám naměřeným v okolních bodech. V případě najetí stroje bez ejektoru, stejně jako při najetí s ejektorem, je zde vysoký rozdíl teploty, jenž je možné přičíst právě k přítomnosti odvaděče kondenzátu v tomto bodě. Může zde tak docházet nejen k lokálnímu snížení vrstvy kondenzátu, ale především k rozrušení vrstvy vzduchu, který brání přestupu tepla.

Bohužel při nájedu stroje po provedené investici nebyl zpracován pokyn pro správné najetí systému s ejektorem a tak obsluha najela systém nejprve dle původního pracovního postupu. To mohlo mít za následek opětovnou tvorbu paro-vzdušné směsi v systému,

a přestože byl systém znovu odstaven a najet již správně s ejektorem, nemusel být vzduch obsažený ve válci odsán. Vlivem této chyby mohou být i rozdíly teplot, kdy paradoxně při provozu bez použití ejektoru bylo dosaženo vyšší povrchové teploty. Pozitivním zjištěním však je snížení rozdílu teplot mezi stranou obsluhy a stranou pohonu stroje, jak naznačuje lineární spojnice trendu v grafech 11 a 12 a také minimální rozdíly průměrných teplot válce při jednotlivých měřeních po provedených úpravách (graf 10).

12.6 Výpočet teoretického tlaku páry potřebného k dosažení žádané povrchové teploty

Při teoretických výpočtech v kapitole 11.3 byl prokázán značný vliv přítomnosti vzduchu ve vytápěném válci. Zatímco v těchto příkladech jsme počítali povrchovou teplotu válce, při následujícím výpočtu nás bude zajímat teoretická tloušťka vrstvy vzduchu při změřené teplotě.

Znamé hodnoty, jež při výpočtu použijeme, jsou:

- $t_{in} = 166,2^{\circ}C$;
- $t_{out} = 25^{\circ}C$;
- $t_4 = 108^{\circ}C$;
- $D_2 = 1,094m$;
- $D_3 = 1,118m$;
- $D_4 = 1,220m$;
- $\alpha_1 = 50 \frac{W}{m^2K}$; $\alpha_2 = 10 \frac{W}{m^2K}$;
- $\lambda_1 = 0,0358 \frac{W}{mK}$; $\lambda_2 = 0,679 \frac{W}{mK}$; $\lambda_3 = 47 \frac{W}{mK}$;

(výpočet bude proveden pro průměrnou teplotu povrchu změřenou po investiční akci)

Hledaná hodnota:

- $D_1 = ? m$;

Výpočet:

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$q_{1m} = \alpha_2 \cdot D_4 \cdot (T_4 - T_{out})$$

$$q_{1m} = 10 \cdot 1,22 \cdot (108 - 25) = 1012,6 \frac{W}{m}$$

Pomocí funkce hledání řešení v programu MS Excel, jež bylo využito při výpočtech v kapitole 11.3, bylo zjištěno, že výše vypočtené hodnotě toku tepla vztaheného na 1 m odpovídá tloušťka vrstvy vzduchu 4,13 mm. Přesto je nepravděpodobné, že dojde k vytvoření vrstvy vzduchu o takové tloušťce. Pravděpodobnější je kombinace vzniku slabé vrstvy vzduchu po obvodu válce vytěsněného ze vzniklé parovzdušné směsi, jejíž absolutní tlak činí 620 kPa, ale parciální tlak páry je poníženo o parciální tlak obsaženého vzduchu a tedy i teplota směsi je nižší než oněch předpokládaných 166,2 °C.

Opět vypočítáme, jakého parciálního tlaku ve směsi by měla dosahovat pára, pokud tloušťka vrstvy vzduchu uvnitř válce bude dosahovat 1mm, 2 mm a 3 mm.

a) Tloušťka vrstvy vzduchu 1 mm:

- $t_{out} = 25^{\circ}C$;
- $t_4 = 108^{\circ}C$;
- $D_1 = 1,092m$;
- $D_2 = 1,094m$;
- $D_3 = 1,118m$;
- $D_4 = 1,220m$;
- $\alpha_1 = 50 \frac{W}{m^2K}$; $\alpha_2 = 10 \frac{W}{m^2K}$;
- $\lambda_1 = 0,0358 \frac{W}{mK}$; $\lambda_2 = 0,679 \frac{W}{mK}$; $\lambda_3 = 47 \frac{W}{mK}$;

$$q_{1m} = \alpha_2 \cdot D_4 \cdot (T_4 - T_{out})$$

$$q_{1m} = 10 \cdot 1,22 \cdot (108 - 25) = 1012,6 \frac{W}{m}$$

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_4}} = 8,832 \frac{W}{mK}$$

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$T_{in} = \frac{q_{1m}}{k_{1m}} + T_{out} = 412,8K$$

$$t_{in} = 139,7^{\circ}C$$

b) Tloušťka vrstvy vzduchu 2 mm:

- stejné jako předchozí, pouze

- $D_1 = 1,090m$;

$$q_{1m} = 10 \cdot 1,22 \cdot (108 - 25) = 1012,6 \frac{W}{m}$$

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_4}} = 8,275 \frac{W}{mK}$$

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$T_{in} = \frac{q_{1m}}{k_{1m}} + T_{out} = 420,5K$$

$$t_{in} = 147,4^\circ C$$

c) Tloušťka vrstvy vzduchu 3 mm:

- stejné jako předchozí, pouze

- $D_1 = 1,088m$;

$$q_{1m} = 10 \cdot 1,22 \cdot (108 - 25) = 1012,6 \frac{W}{m}$$

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_4}} = 7,784 \frac{W}{mK}$$

$$q_{1m} = k_{1m} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$T_{in} = \frac{q_{1m}}{k_{1m}} + T_{out} = 428,2K$$

$$t_{in} = 155,1^\circ C$$

Z výsledků je patrné, že se zvětšující se tloušťkou vzduchové vrstvy dochází k výrazné změně požadované teploty uvnitř válce, kterou zajistíme dosažení dané povrchové teploty. Nárůst vrstvy vzduchu o 1mm odpovídá požadovanému nárůstu teploty uvnitř válce přibližně o 8°C. Z tohoto výsledku je zřejmé, jak důležité je vytěsnit veškerý vzduch z vnitřního prostoru clupakového válce.

Pokud bychom předpokládali ideální provoz clupakové jednotky, kdy jsme při najetí paro-kondenzátního systému vytěsnili z válce veškerý vzduch a při jeho stabilním provozu

se po jeho vnitřním obvodu vytvořila vrstva kondenzátu o síle 12 mm, činila by potřebná požadovaná teplota uvnitř válce, pro dosažení povrchové teploty naměřených 108 °C, pouhých 114 °C.

Pro správný chod jednotky clupak je potřeba dosahovat povrchové teploty v rozmezí 115 až 120 °C. Zároveň musí být příčný teplotní profil válce rovnoměrný. Pro ideální podmínky s tloušťkou vrstvy kondenzátu ustálenou na hodnotě 12 mm, by se teplota uvnitř válce, pro dosažení uvedených požadovaných teplot povrchu válce, měla pohybovat v rozmezí od 121 °C do 127 °C. Těmto teplotám odpovídá tlak páry v rozmezí od 206 kPa do 248 kPa.

13 Diskuze, doporučení a závěr řešeného tématu

Cílem této diplomové práce bylo poukázat na negativní vliv inertního plynu, v našem případě vzduchu, na přestup tepla při sušení papírového pásu v sušící části papírenského stroje. Teoretickými výpočty bylo dokázáno, že přítomnost vzduchu v systému má značný vliv na přestup tepla a působí zde jako významný izolant.

Předmětem zkoumání byla clupaková jednotka, jejíž válec je stejně, jako sušící válec umístěné v sušící části, vytápěn parou. Úkolem tohoto válce není sušit papír, ale v krátké době odpařit kondenzát obsažený ve směsi kondenzátu a silikonové emulze, jež je na tento válec nanášena. Aby toho bylo dosaženo, je třeba zajistit dostatečnou povrchovou teplotu válce. Důvodem, proč byla vybrána jednotka clupak, je oproti ostatním sušícím válcům její dobrá dostupnost a možnost měření povrchové teploty v celé šíři vytápěného válce.

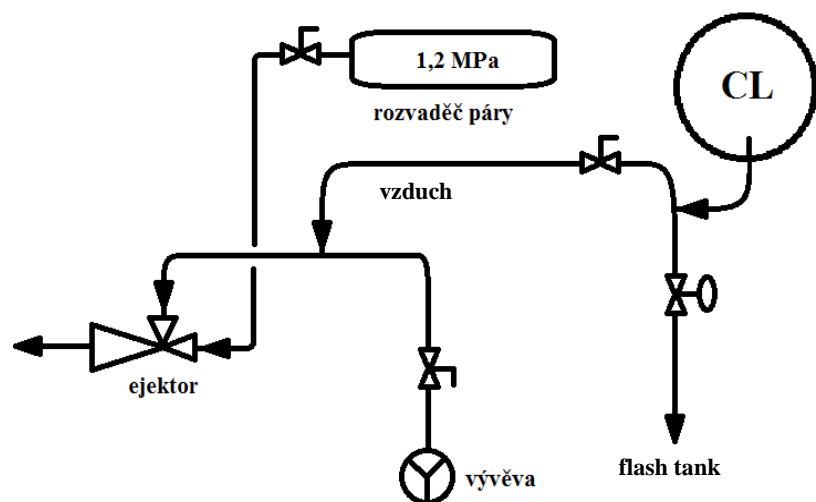
13.1 Pilotní projekt

K volbě clupakového válce přispěl i fakt, že zde byl naplánován projekt instalace nového zařízení pro odvod vzduchu z válce. Byla zde tedy možnost porovnat chování systému před a po provedení investice.

Úpravami, které zde v závěru roku 2015 proběhly, byly:

- výměna naběráků rotačních sifonů
- kontrola rozrážecích (spoilerových) tyčí uvnitř válce
- instalace ejektoru do systému odvodu kondenzátu z válce.

Především instalace ejektoru měla zajistit dostatečný odvod vzduchu z válce a zlepšit tak prostup tepla a zajištění požadované hodnoty teploty na povrchu válce. Ze získaných měření ovšem nelze s určitostí prokázat jeho zásadní vliv. To však může být způsobeno neodborným najetím systému obsluhou, která nebyla po jeho instalaci seznámena se správným postupem jeho najetí.



Obr. 23: Zjednodušené schéma zapojení ejektoru

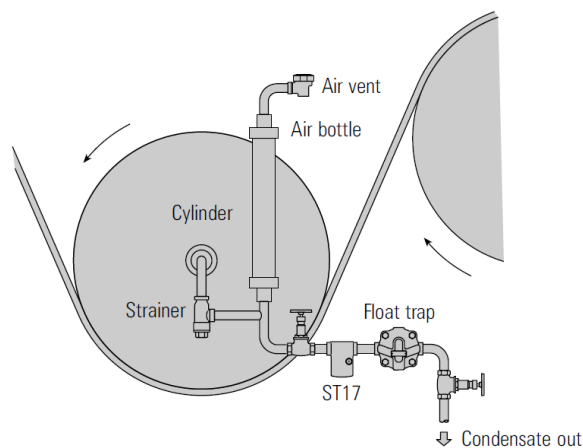
Přesto je z naměřených hodnot patrné zlepšení rovnoměrnosti příčného teplotního profilu a dosažení malého rozptylu průměrné teploty mezi jednotlivými měřeními.

Za zmínku stojí i výrazný teplotní rozdíl naměřený ve 2/3 délky válce od strany obsluhy. Důvodem může být umístění naběráku kondenzátu a narušení izolační vrstvy vzduchu v tomto místě.

13.2 Doporučení dalšího postupu

V první řadě je nezbytně nutné provést proškolení obsluhy mající na starost najíždění paro-kondenzátního systému. Sebelepší zařízení nebude fungovat správně, pokud jej nebude ovládat znalá obsluha. Další z příležitostí bude odstávka stroje během měsíce ledna 2016, kdy bude možné obsluhu seznámit s najetím ejektoru včetně praktické ukázky. Přesto by mělo proběhnout i teoretické školení, které poukáže na výhody tohoto zařízení a naučí s ním operátory pracovat.

Dalším postupem by mělo být opakované měření povrchové teploty válce pro ověření funkčnosti ejektoru. Tato příležitost se naskytne prakticky po každém najetí stroje, neboť po ustálení provozu by hodnoty již měly být neměnné. Potvrdí-li se domněnka o nedostatečném odvodu vzduchu paro-kondenzátního systému, bude vhodné uvažovat



Obr. 24: Možné řešení odvodu vzduchu sušícího válce [S2]

o rozšíření tohoto pilotního projektu i na ostatní sušící skupiny, kde lze předpokládat obdobné chování páry, vzduchu a kondenzátu uvnitř válců jako u clupakové jednotky. Kromě možnosti odsátí vzduchu ze sušících válců je vhodné se zaměřit i na odvodu vzduchu parních a kondenzátních tras, včetně všech sborníků, flash tanku a vakuum tanku. Z teoretických výpočtů plyne,

že k dosažení požadované povrchové teploty clupakového válce by měla být dostatečná pára o tlaku „pouhých“ 0,3 MPa oproti stávajícímu tlaku 0,62 MPa. Jde tedy o poloviční hodnotu než je stávající stav. Pokud lze toto chování předpokládat u všech sušících válců, je zde velký potenciál buď k úsporám topného média, nebo ke zvýšení výkonu stroje.

Teoretickou hodnotu 0,3 MPa bude třeba ověřit dalšími měřeními po správném najetí ejektoru.

Pokud bychom se řídili doporučením společnosti Kadant o vhodnosti volby typu sifonu, bylo by vhodné uvažovat o výměně současného rotačního typu za typ stacionární.

13.3 Najetí jednotky clupak po jejím odstavení

K tomu, aby bylo využito potenciálu topného média v maximální možné míře, je třeba provést správné najetí paro-kondenzátního systému. V níže uvedených bodech je stručně popsán tento postup, který může být zároveň vodítkem pro operátory sušící části stroje.

Postup:

1. Otoč s válcem do takové polohy, aby se naběráky rotačních sifonů nacházely u dna válce (inspekční otvor v horní polovině válce, nad jeho osou).
2. Ponechej uzavřený vstup páry do válce i výstup kondenzátu z válce do flash tanku.
3. Najed' ejektor:
 - a. Ponechej otevřený pákový ventil vedoucí z válce k ejektoru.
 - b. Otevři ventil hnacího média (1,2 MPa pára) k ejektoru.
 - c. Vyčkej 15 minut
4. Pomalu otvírej přívod páry do válce.
 - Je důležité, aby nedošlo k náhlému otevření vstupního ventilu, což by mohlo mít za následek vznik paro-vzdušné směsi.
 - Zároveň je vzduch vytlačován pomocí páry k naběrákům a těmi nasáván vzniklým podtlakem z ejektoru.
5. Jakmile dojde k růstu měřeného tlaku ve válci, otevři pomalu pákový ventil odvodu kondenzátu do flash tanku.
6. Uzavři pákový ventil vedoucí od válce k ejektoru (ejektor nyní bude zajišťovat podtlak v celém paro-kondenzátním systému).
7. Roztoč clupakový válec.
8. Zvyš hodnotu tlaku páry ve válci na hodnotu požadovanou.

13.4 Závěr

Navrhují pokračovat v ověřování vlivu ejektoru na provoz clupakového válce. Tato měření vyhodnotit a při potvrzení pozitivního vlivu pokračovat v podobném duchu i s úpravou paro-kondenzátního systému v sušící části. Pokud se podaří při dalším najetí

systemu dosáhnout vyšších teplot povrchu válce, bude to jasným signálem, že je ve válcích obsažen vzduch, který značně brání prostupu tepla z vnitřku válce k sušenému papíru.

Při dosažení výrazně vyšších teplot, než je požadované rozmezí 115 – 120 °C, snižovat vstupní tlak páry do clupakového válce a ověřit tak, zda lze těchto teplot dosáhnout při hodnotě tlaku média 300 kPa. Pokud se měřeními ověří teoretický vpočet, lze uvažovat o změně média z tlaku 1,2 MPa na 0,3 MPa a využít tak páry o tlaku 1,2 MPa při výrobě elektřiny na úseku energetiky.

14 Použité zdroje

Literatura

[1] BÍLEK, Miloš. Štětsko: historie a současnost. Štětí: Město Štětí, 2010, 199 s. ISBN 978-80-254-9887-3

[2] KALČÍK, Josef. Technická termodynamika. 2. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963, 565 s.

[3] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

[4] FIBICH, Jiří a Ivan LITOMISKÝ. Technologie papíru. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1989, 368 s.

[5] AHSAN Amimul. Evaporation, condensation and heat transfer. 1. vyd. Rijeka: Published by InTech, 2011, 582 s. ISBN 978-953-307-583-9

Internetové zdroje

[I1] La lignina como material de sostén . Ciencias de Joseleg. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: <http://cienciasdejoseleg.blogspot.cz/2015/01/la-lignina-como-material-de-sosten.html>

[I2] Products & Services. VOITH. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: <http://voith.com/en/products-services/paper/process-steps/paper-machines/dryer-section-10732.html?page=1>

[I3] Pyrox. VOITH. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: http://resource.voith.com/vp/publications/downloads_export/1510_e_2015-05-28_vpz-1287_pyrox_en_interaktiv.pdf

[I4] Cantilever Stationary Syphons. KADANT. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: <http://www.kadant.com/files/4714/4381/4599/Cantilever-Stationary-Syphons-1007-BR-EN.pdf>

[I5] Ejektory a jejich využití v průmyslu. VUTBR. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65149

[I6] Přístroje. Ahlborn. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z:

<http://www.ahlborn.cz/pristroje/vicekanalove-merici-pristroje-almemo/almemo-2490-2-merici-pristroj-s-2-univerzalnimi-vstupy.html>

[I7] Air Properties . The Engineering Toolbox. [online]. 17.1.2016 [cit. 2016-01-17].

Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html

Softwarové zdroje

[S1] NEUŽIL, Martin. Miniaudit PM5. Praha, 2015

[S2] SPIRAXSARCO. Odvzdušnění parních soustav. Praha, 2015

[S3] SPIRAXSARCO. Pára a odvádění kondenzátu. Praha, 2015

[S4] SPIRAXSARCO. Rozvod páry. Praha, 2015

[S5] VOITH. Voith – Inspekční report. Laakirchen/Oberweis, 2012

[S6] Valmet. Valmet – General training material PM5. Štětí, 2015

15 Seznam použitých zkratek a znaků

HCR	high consistency refiner, mletí při vysoké konzistenci
LCR	low consistency refiner, mletí při nízké konzistenci
CFM	Cubic Feet of Air Per Minute, veličina propustnosti sušicího síta
σ_{sp}	povrchové napětí stěny proti páře
σ_{sk}	povrchové napětí stěny proti kapalině
σ_{kp}	povrchové napětí kapaliny proti páře
β	okrajový úhel
Q	množství přeneseného tepla [W]
λ	tepelná vodivost [W/mK]
A, S	velikost teplosměrné plochy [m ²]
t	teplota [°C]
T	teplota [K]
s, X	tloušťka stěny [m]
α	součinitel přenosu tepla [W/m ² K]
k	celkový koeficient přenosu tepla [W/mK]
L	délka [m]
q_{1m}	tepelný tok na jeden metr délky [W/m]
D	průměr [m]

16 Seznam obrázků

Obr. 1: Stavba dřeva - legenda (zleva): vodíkové vazby, celulóza, lignin, hemicelulóza [I1].....	6
Obr. 2: Kryt sušící části od společnosti VOITH [I2]	9
Obr. 3: Ukázka sušícího síta Pyrox od společnosti VOITH [I3].....	11
Obr. 4: Běh papíru při slalomovém vedení sušícího síta bez stabilizace a se stabilizací pomocí stabilizátoru [5]	12
Obr. 5: Chování kondenzátu v sušícím válci [5].....	14
Obr. 6: Schéma paro-kondenzátního systému PS5	15
Obr. 7: Řešení stacionárního sifonu a parní hlavy společnosti KADANT [I4]	17
Obr. 8: Fáze sušení papíru [5]	18
Obr. 9: Povrchové napětí na okraji kapky při nedokonalém smáčení [2]	19
Obr. 10: Jednoduchá válcová stěna [2]	20
Obr. 11: Složená válcová stěna [2]	21
Obr. 12: Prostředí uvnitř a vně válce [5].....	23
Obr. 13: Průběh teplot na řezu pláštěm válce.....	29
Obr. 14: Průběh teplot na řezu pláštěm válce s vrstvou kondenzátu na vnitřní stěně	31
Obr. 15: Průběh teplot na řezu pláštěm válce s vrstvou vzduchu a kondenzátu uvnitř válce	35
Obr. 16: Regulační obvod vytápění clupakového válce.....	40
Obr. 17: Systém Duplex [S1].....	41
Obr. 18: Pohled do otevřeného clupakového válce [S5].....	41
Obr. 19: Skladba ejektoru: 1- vstupní kanál hnané látky, 2 - tryska, 3 - vstupní kanál hnací látky, 4 - směšovací komora, 5 – difuzor [I5]	43
Obr. 20: Místo měření povrchové teploty válce.....	44
Obr. 21: ALMEMO 2490-1L [I6]	45
Obr. 22: Čidlo FT9307TG [I6].....	45
Obr. 23: Zjednodušené schéma zapojení ejektoru	55
Obr. 24: Možné řešení odvzdušnění sušícího válce [S2]	56

17 Seznam tabulek

Tab. 1: Zdroje odporu a tepelné toky [5]	24
Tab. 2: Vlastnosti páry	27
Tab. 3: Výpočet povrchové teploty clupakového válce a tepelný tok vztažený na 1 m délky válce při různé tloušťce vrstvy kondenzátu	33
Tab. 4: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=100 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	36
Tab. 5: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=50 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	37
Tab. 6: Vliv vrstvy vzduchu uvnitř válce při hodnotě součinitele přestupu tepla $\alpha_1=10 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	37
Tab. 7: Naměřené hodnoty při provozu po najetí systému bez ejektoru.....	46
Tab. 8: Parametry provozu stroje při měření	46
Tab. 9: Naměřené hodnoty při provozu po najetí systému s ejektorem.....	46
Tab. 10: Parametry provozu stroje při měření	46
Tab. 11: Průměrné teploty v příčném profilu a celková průměrná teplota válce pro jednotlivá měření	48
Tab. 12: Vlastnosti vzduchu [I7].....	65

18 Seznam grafů

Graf 1: Závislost teploty a výparného tepla na absolutním tlaku páry.....	28
Graf 2: Závislost měrné hmotnosti na absolutním tlaku páry	28
Graf 3: Vliv tloušťky vrstvy kondenzátu na povrchovou teplotu válce a tepelný tok vztažený na 1 m délky.....	34
Graf 4: Závislost teploty povrchu válce na tloušťce vrstvy vzduchu uvnitř válce při různých hodnotách α_1	38
Graf 5: Závislost celkového koeficientu prostupu tepla na tloušťce vrstvy vzduchu při různých hodnotách α_1	38
Graf 6: Závislost tepelného toku vztaženého na 1 m délky válce na tloušťce vrstvy vzduchu při různých hodnotách α_1	39
Graf 7: Doporučené hodnoty diferenčního tlaku při použití stacionárního a rotačního odvaděče kondenzátu firmou Kadant [14].....	42
Graf 8: Teplotní profil napříč válcem před instalací ejektoru	47
Graf 9: Teplotní profil napříč válcem po instalaci ejektoru	47
Graf 10: Průměrná teplota válce při jednotlivých měřeních	48
Graf 11: Teplotní profil clupakového válce - průměrné teploty v bodě měření.....	49
Graf 12: Teplotní profil clupakového válce - průměrné teploty v bodě měření po vyloučení teploty s nejvyšší relativní chybou	49

19 Přílohy

<u>Temperature</u> - t - (°C)	<u>Density</u> - ρ - (kg/m ³)	<u>Specific Heat</u> - c_p - (kJ/(kg K))	<u>Thermal Conductivity</u> - k - (W/(m K))	<u>Kinematic Viscosity</u> - ν - $\times 10^{-6}$ (m ² /s)	<u>Expansion Coefficient</u> - β - $\times 10^{-3}$ (1/K)	<u>Prandtl's Number</u> - Pr -
0	1.293	1.005	0.0243	13.30	3.67	0.715
20	1.205	1.005	0.0257	15.11	3.43	0.713
40	1.127	1.005	0.0271	16.97	3.20	0.711
60	1.067	1.009	0.0285	18.90	3.00	0.709
80	1.000	1.009	0.0299	20.94	2.83	0.708
100	0.946	1.009	0.0314	23.06	2.68	0.703
120	0.898	1.013	0.0328	25.23	2.55	0.70
140	0.854	1.013	0.0343	27.55	2.43	0.695
160	0.815	1.017	0.0358	29.85	2.32	0.69
180	0.779	1.022	0.0372	32.29	2.21	0.69
200	0.746	1.026	0.0386	34.63	2.11	0.685

Tab. 12: Vlastnosti vzduchu [I7]

PROPERTIES OF WATER IN THE RANGE 0 — 100 °C

This table summarizes the best available values of the density, specific heat capacity at constant pressure (C_p), vapor pressure, viscosity, thermal conductivity, dielectric constant, and surface tension for liquid water in the range 0 — 100 °C. All values (except vapor pressure) refer to a pressure of 100 kPa (1 bar). The temperature scale is IPTS-68.

t °C	Density g/cm ³	C_p J/g K	Vap. pres. kPa	Visc. μPa s	Ther. cond. mW/K m	Diel. const.	Surf. ten. mN/m
0	0.99984	4.2176	0.6113	1793	561.0	87.90	75.64
10	0.99970	4.1921	1.2281	1307	580.0	83.96	74.23
20	0.99821	4.1818	2.3388	1002	598.4	80.20	72.75
30	0.99565	4.1784	4.2455	797.7	615.4	76.60	71.20
40	0.99222	4.1785	7.3814	653.2	630.5	73.17	69.60
50	0.98803	4.1806	12.344	547.0	643.5	69.88	67.94
60	0.98320	4.1843	19.932	466.5	654.3	66.73	66.24
70	0.97778	4.1895	31.176	404.0	663.1	63.73	64.47
80	0.97182	4.1963	47.373	354.4	670.0	60.86	62.67
90	0.96535	4.2050	70.117	314.5	675.3	58.12	60.82
100	0.95840	4.2159	101.325	281.8	679.1	55.51	58.91
Ref.	1—3	2	1, 3	3	3	4	5

REFERENCES

1. L. Harr, J. S. Gallagher, and G. S. Kell, *NBS/NRC Steam Tables*, Hemisphere Publishing Corp., 1984.
2. K. N. Marsh, Ed., *Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1987.
3. J. V. Sengers and J. T. R. Watson, Improved international formulations for the viscosity and thermal conductivity of water substance, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 15, 1291, 1986.
4. D. G. Archer and P. Wang, The dielectric constant of water and Debye-Hückel limiting law slopes, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 19, 371, 1990.
5. N. B. Vargaftik, et al., International tables of the surface tension of water, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 12, 817, 1983.