



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KAVITAČNÍ OHŘÍVAČ

CAVITATION HEATER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Rovder

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Juraj Rovder**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Kavitační ohřivač

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních 10 letech se objevují protichůdné informace o tzv. "kavitačních kotlích" pro ohřev vody. Nejčastěji jsou tyto informace spojeny s velmi vysokými účinnostmi přeměny mechanické energie na tepelnou. Bakalářská práce by měla shrnout dostupné informace o tomto zařízení a prezentovat výsledky prvního technicky zdokumentovaného nezávislého měření na jednom exempláři kavitačního kotle v laboratoři odboru fluidního inženýrství V. Kaplana.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše z dostupných literárních, patentových a internetových zdrojů k problematice kavitačního ohřivače/kotle.
2. Návrh a provedení experimentu.
3. Diskuse experimentálních výsledků.
4. Návrh možných konstrukčních úprav stávajícího kavitačního ohřivače.

Seznam doporučené literatury:

VED, Viktor, Valeriy NIKOLSKY, Olga OLIVNYK a Alexander LIPEEV. EXAMINING A CAVITATION HEAT GENERATOR AND THE CONTROL METHOD OVER THE EFFICIENCY OF ITS OPERATION. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017, 8(88), 7. ISSN 1729-4061

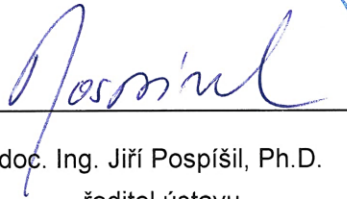
Tekmash Group: Heater TEK [online]. Ukrajina: Tekmash, 2017 [cit. 2017-10-26]. Dostupné z: <http://tekmash.org/catalog/goods/95>

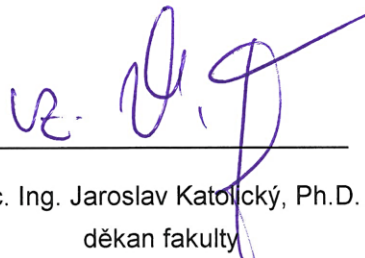
Spec-Tech: Cavitation heating [online]. Ukrajina: Spec-Tech, 2017 [cit. 2017-10-26]. Dostupné z: http://spec-tech.sk/?page_id=16

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017




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


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

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou zariadení slúžiacich na ohrev vody kavitáciou. V teoretickej časti budú uvedené základne princípy funkcie týchto strojov a opísané vybrané zariadenia. V ďalšie kapitoly opisujú konštrukciu a návrh experimentu konkrétneho stroja. Následne sa namerané výsledky zhodnotia a porovnajú. Na záver bude navrhnutých niekoľko konštrukčných úprav požitého exempláru kavitačného kotla.

Kľúčové slová

Kavitácia, ohrev, voda, zariadenie, stroj, experiment, vyhodnotenie, kavitačný ohrievač, účinnosť

ABSTRACT

This report is considering an equipment that is using cavitation to heat water. The theoretical part explains basic principles of its function and different types of such device. Following chapters describe a construction of used heater and an experiment carried out on this device. The results of the experiment are collected and evaluated. The final part of the thesis contains suggested adjustments of the given cavitation heater.

Key words

Cavitation, heater, water, device, equipment, experiment, evaluation, cavitation heater, efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ROVDER, J. *Kavitační ohřivač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som bakalársku prácu s názvom Kavitačný ohrievač vypracoval samostatne s použitím uvedených zdrojov, ktoré tvoria prílohu práce.

Dátum

Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu tejto práce doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za cenné rady, pripomienky a jeho zvedavosť, bez ktorej by táto práca nevznikla. Taktiež by som sa chcel poďakovať svojej rodine a priateľom: Štefanovi Rovderovi, Ing. Jánovi Šefčíkovi, Kristíne Mrovčákovej a Bc. Rastislavovi Ondicovi za pomoc a podporu pri konštrukčnom návrhu ohrievača a písaní tejto práce.

Podpis

OBSAH

ÚVOD.....	14
1. Kavitácia.....	15
2. Prehľad vybraných kavitačných tepelných generátorov.....	17
2.1. Zariadenie na ohrev tekutín – Griggs [7].....	17
2.2. Zariadenie a metóda ohrevu tekutín – Thoma [8].....	18
2.3. Vysoko účinný ohrievač používajúci energiu vákua – Chang [1].....	19
2.4. Rotačné impulzné zariadenie RIA [4, 11].....	20
2.5. Kavitačný tepelný generátor [9, 12].....	22
3. Návrh konštrukcie kavitačného ohrievača.....	24
3.1. Rotor	25
3.2. Hriadeľ	26
4. Návrh a priebeh experimentu	28
4.1. Schéma zapojenia	28
4.2. Priebeh experimentu	28
5. Vyhodnotenie experimentu	31
5.1. Výsledky experimentu	32
5.1.1. Závislosť medzi príkonom a výkonom.....	32
5.1.2. Závislosť príkonu a účinnosti od kavitačného čísla	33
5.1.3. Závislosť príkonu od Reynoldsovho čísla.....	34
6. Diskusia	36
6.1. Konštrukčné úpravy kavitačného kotla.....	39
Záver.....	40
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	42
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	44
ZOZNAM OBRÁZKOV	46
ZOZNAM PRÍLOH.....	47

ÚVOD

Zariadenia slúžiace na ohrev vody alebo vykurovanie priestorov sa delia na niekoľko kategórií. Kotly spaľujúce tuhé či kvapalné palivo alebo zemný plyn sú najrozšírenejšie zdroje teplej úžitkovej vody. Ďalšou možnosťou je ohrev pomocou elektrickej energie, ako napríklad malé prietokové ohrievače. V dnešnej dobe sa tiež rozširujú systémy využívajúce zelenú energiu, ako napríklad solárne kolektory prípadne tepelné čerpadlá. Najmenej známymi zariadeniami na ohrev vody sú tzv. kavitačné tepelné generátory, ktoré premieňajú mechanickú energiu priamo na tepelnú pomocou javu nazývaného kavitácia. Často sú však informácie o týchto zariadeniach spájané s účinnosťami vyššími ako 100% [1]. Z tohto dôvodu sú tieto zariadenia častým predmetom sporov spojených s veľkou mierou skepticizmu v akademických kruhoch. Na základe vyššie uvedeného problému som si vybral túto tému bakalárskej práce - vniesť svetlo do daného problému jedným z prvých nestranných meraní kavitačného ohrievača.

Prvá časť bakalárskej práce je venovaná problematike kavitácie, jej základnému opisu a zariadeniam využívajúcim kavitáciu na ohrev pracovnej látky. Rešerš načrtne základný prierez existujúcimi kavitačnými ohrievačmi a ich popisom z dostupných patentových a internetových zdrojov, vrátane niektorých meraní týchto zariadení. Tiež budú vymenované niektoré výhody a nevýhody kavitačných tepelných generátorov. Praktická časť bakalárskej práce je venovaná konkrétnemu kavitačnému kotlu vlastnej konštrukcie, návrhu, opisu a výpočtu základných častí tohto stroja. Bude navrhnutý a vykonaný experiment. Z vykonaných meraní ohrievača sa následne zhodnotia výsledky, ktoré sa porovnajú s inými zariadeniami na ohrev vody. Posledná kapitola bude venovaná návrhu nového stroja na základe vykonaných meraní a s ohľadom na konštrukčné nedostatky meraného zariadenia.

1. Kavitácia

Kavitačné tepelné generátory pracujú na princípe kavitácie, ktorá je vo všeobecnosti nežiadúcim javom. Aby sme lepšie porozumeli mechanizmu premeny mechanickej energie na tepelnú musíme si ozrejmiť nukleáciu a životný cyklus kavity. Bubliny (kavity) nasýtenej pary vznikajú v kvapaline dvomi spôsobmi – varom a kavitáciou. Počas varu sa kvapalina s konštantným tlakom ohrieva nad teplotu nasýtenia. Teplota nasýtenia korešponduje s tlakom nasýtených pár. Pri prekročení tejto teploty dochádza k zmene fázy kvapaliny – tlak nasýtených pár je vyšší ako tlak v kvapaline, dochádza k vzniku bublín nasýtených pár. Mechanizmus vzniku kavít je podobný ako v prípade varu. V kvapaline s konštantnou teplotou je znižovaný tlak pod hodnotu tlaku nasýtených pár pre konkrétnu teplotu (v prípade vody je tlak pár p_v pri teplote $t = 20^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 100\text{ kPa}$ $p_v = 2,3\text{ kPa}$). Pri prekročení tohto tlaku kvapalina zmení svoju fázu a dochádza ku vzniku kavít [2, h-x diag.].

Kavitáciu podľa typu tvorby bublín rozdeľujeme na homogénnu a heterogénnu. Homogénna tvorba bublín je zapríčinená tepelnou energiou molekúl v kvapaline. V každom reálnom systéme sa vyskytuje prakticky vždy jedine heterogénna nukleácia. V technickej praxi sa heterogénna nukleácia bublín vyskytuje na rozhraní medzi kvapalinou a pevným telesom. Rozhrania môžu byť steny nádoby (potrubia) ale aj nečistoty rozptýlené v kvapaline. Ďalšou možnou formou rozhrania sú aj mikrobubliny plynu. Vo vode sa mikrobubliny rozpusteného vzduchu dokážu udržiavať veľmi dlho. V skutočnosti je prakticky nemožné sa úplne zbaviť mikrobublín vzduchu vo vode. Napríklad zníženie koncentrácie mikrobublín pod 3ppm (častíc na milión) trvá niekoľko týždňov. Vznik kavít môže byť tiež zapríčinený kozmickým žiarením. Kolíziou vysoko energetických častíc a molekúl kvapaliny dokáže vzniknúť dostatočné teplo na nukleáciu bublín pary [2].

Najčastejším dôvodom vzniku kavitácie v prúdiacich kvapalinách sú hydrodynamické efekty prúdenia, ktoré zapríčiňujú lokálne poklesy tlaku v kvapaline pod tlak nasýtených pár. Prúdenie, v ktorom sa vyskytuje lokálne nižší tlak môžeme nájsť napríklad na lopatkách lodných skrutiek, v hydrodynamických čerpadlách, v oblastiach s výskytom turbulentných prúdení alebo aj v oblasti za rýchlo sa pohybujúcim pevným telesom, ktoré vstúpilo do kvapaliny. Vírová kavitácia sa vyskytuje v oblasti turbulentných prúdení. Konkrétne v oblasti, kde sa vyskytuje zložka rýchlosti v kvapaline kolmá na smer prúdenia.



Obr. 1 Kavitácia na lodnej skrutke [3]

Dĺžka života kavity trvá len niekoľko milisekúnd a prechádza niekoľkými fázami. Prvou fázou je nukleácia bubliny nasýtenej pary z dôvodu lokálneho poklesu tlaku v kvapaline a jej postupný rast. Kavita sa časom presunie do oblasti s vyšším tlakom pod ktorým sa kavita deformuje a kolabuje. Počas kolapsu bubliny nasýtená para kondenzuje na rozhraní kavity a kvapaliny. Plyn rozpustený v kvapaline difunduje cez povrch bubliny do kavity v ktorej je adiabaticky stláčaný. Výsledkom je výskyt vysokých tlakov a teplôt v kavitě. Počas zániku kavity tiež vznikajú tzv. microjety, ktorých rýchlosť sa blíži rýchlosti zvuku v danej kvapaline. Tieto javy sa podieľajú na vzniku kavitačnej erózie materiálu (Obr. 2). Narušenie povrchu kavitáciou je v podstate únavové poškodenie spôsobené opakovaným zánikom kavit v oblasti, ktoré časom dokáže úplne oddeľovať materiál súčiastky a ničiť geometriu obtekaných plôch. Kavitácia úplne znemožní funkciu zariadenia v ktorom sa vyskytuje a preto je javom, ktorému sa chceme vo väčšine hydraulických zariadení vyhnúť [2, 4, 5].



Obr. 2 Kavitačná erózia [2]

2. Prehľad vybraných kavitačných tepelných generátorov

Kavitačné tepelné generátory využívajú tepelné efekty kavitácie vo svoj prospech. Ako sme písali v prvej kapitole, počas kolapsu sa difundovaný plyn v kavite adiabaticky stláča a výrazne sa ohrieva. Podľa práce Thomita a Shima [6] je maximálna teplota plynu v strede kavity približne 8500°C. Avšak vplyvom tepelného toku do kvapaliny je skutočná teplota nižšia ako odhad Thomita a Shimu a to len 6400°C s tlakom 84,8MPa v centre. Z dôvodu veľkých tepelných gradientov je teplota rozhrania kavity približne 3100°C. Tieto extrémne teploty však trvajú len zlomok mikrosekundy a v priebehu pár sekúnd klesnú na teplotu okolitého média [2]. Navzdory krátkemu trvaniu týchto teplôt sa časť tepla vedením dostane do pracovnej látky a tým ju ohrieva. Je nutné však poznamenať, že tento proces je len hypotézou, pretože do teraz nebol ešte dokázaný alebo experimentálne overený.

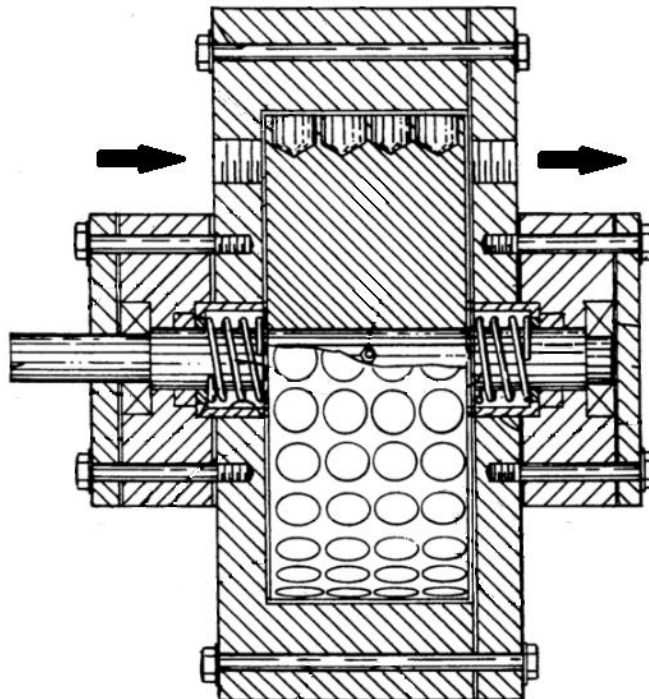
Zariadenia využívajúce kavitáciu týmto spôsobom pozostávajú zo špeciálneho rotora, ktorý funguje ako generátor kavít. Môže ísť o valce alebo kužele s dierami alebo drážkami na obvode [7], tiež sú však známe aj varianty konštrukcie s rotujúcim diskom a nepravidelnosťami na čelách rotora [8, 9]. Pracovná látka je vedená do kavitačného ohrievača, v ktorom geometria rotora a pracovného priestoru vytvárajú v stroji tlakové rozdiely a následnú kavitáciu, ktorá ohrieva pracovnú látku (najčastejšie vodu). Kavitačné tepelné generátory ohrievajú pracovnú látku rozdielnym spôsobom než iné zariadenia slúžiace na ohrev vody, a to priamo vo vnútri kvapaliny.

Konvenčné zariadenia určené na ohrev vody ako sú napríklad kotly, prietokové ohrievače alebo aj rýchlovarné kanvice sa vyznačujú problémami spôsobenými usadeninami, ktoré zhoršujú prenos tepla a výrazne znižujú účinnosť a skracujú životnosť týchto zariadení. Usadeniny vznikajú zrážaním zlúčenín vápniku a iných nečistôt rozpustených vo vode na povrchoch teplejších ako ohrievané médium [10]. Kavitačné tepelné generátory nemajú žiadne teplovýmenné plochy, a preto majú v porovnaní s konvenčnými ohrievačmi v tomto smere výhodu. Stále sa však v týchto strojoch vyskytuje kavitácia a s tým spojená kavitačná erózia, ktorá obmedzuje ich životnosť. Nepriaznivými účinkami kavitácie na tieto zariadenia sa v tejto práci nebudeme zaoberať z dôvodu časovej náročnosti experimentu, no stále ostáva táto problematika dôležitá a patrí jej náležitá pozornosť. Ďalším nepriaznivým javom je výrazná akustická emisia sprevádzajúca chod týchto zariadení.

2.1. Zariadenie na ohrev tekutín – Griggs [7]

Americký vynálezca James Griggs patentoval v roku 1993 zariadenie na ohrev tekutín využívajúce kavitáciu. Zariadenie bolo jedným z prvých svojho druhu vôbec. Celé zariadenie môže byť vyrábané z hliníka, prípadne nerezovej ocele. Kavitačný ohrievač generuje kavitu otáčaním rotora v tvare plného valca s dierami na obvode rôznych geometrií. Rotor je uložený na hriadelí medzi guľôčkovými ložiskami, ktoré sú uložené v ložiskových skriniach, ktoré sú z dôvodu ľahkej údržby odnímateľné. Zariadenie môže byť poháňané elektromotorom alebo spaľovacím motorom. Potrebný výkon motora je stanovený pracovnými otáčkami, priemerom rotora a geometriou dier na obvode rotora. Pracovný priestor je v prípade Griggsovho zariadenia izolovaný dvojicou mechanických upchávok, ktoré sú tiež uložené v ložiskových skriniach. Zariadenie má oddelené príruby od ložiskových skriň, ktoré sú navzájom spojené skrutkami. Jedna z prírub má tvar misy a zároveň tvorí s bubnom jeden celok. Inou prezentovanou možnosťou je riešenie oboch prírub týmto spôsobom. Voda je privádzaná do

zariadenia skrz vstupný otvor s priemerom $\frac{1}{2}$ s trúbkovým závitom pre jednoduchú montáž armatúry. Medzera medzi rotorom a bubnom je 2,5 mm ale môže sa meniť v závislosti od parametrov, ako napríklad požadovaný prietok alebo od otáčok na rotore. Vnútna plocha bubna môže byť hladká, prípadne s nepravidelnosťami v tvare drážok alebo dier [7].



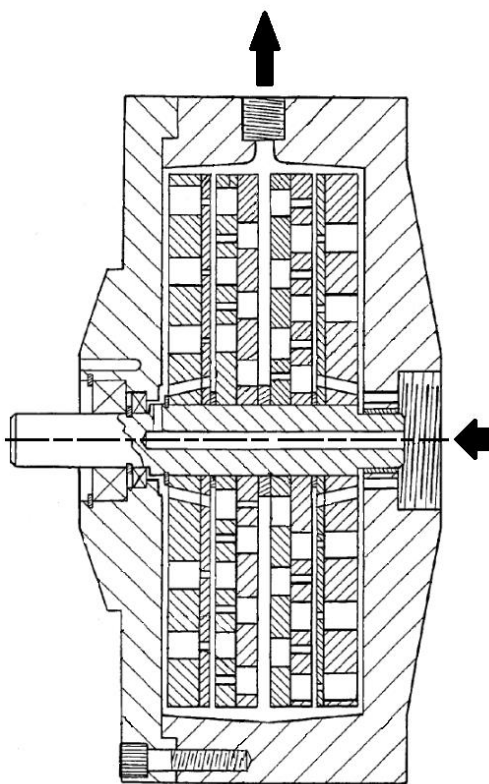
Obr. 3 Zariadenie na ohrev tekutín J. Griggs 1993 [7]

Pracovné otáčky tohto zariadenia merané s tlakom na vstupe 450 kPa sú rozdielne pre rozličné rotory a v závislosti na priemeroch sa pohybujú od 5000 min^{-1} pre rotor s priemerom cca 150 mm a 3450 min^{-1} pre rotor s priemerom 190 mm až 254 mm. V patente sa uvádza teplota vody na výstupe z ohrievača približne 150°C a rozdiel tlakov medzi vstupom a výstupom 103 kPa. [7].

2.2. Zariadenie a metóda ohrevu tekutín – Thoma [8]

Zariadenie patentované americkým vynálezcom Christianom Thomom, v roku 2005, je zaujímavým konštrukčným vylepšením pôvodného Griggsovho kavitačného tepelného generátora. V pôvodnom zariadení je voda vedená cez vstupný otvor do pracovného priestoru v tvare valca, v ktorom sa otáča vysokými otáčkami rotor. Griggsov kavitačný ohrievač využíva rotor, ktorý má diery vyvrtané po celej dĺžke vonkajšieho priemeru, uložený na hriadelí medzi ložiskami. Thomova modifikácia spočíva v nahradení valcového rotora perforovaným diskom, ktorý je uložený letmo. Výhodou využitia perforovaného disku je možnosť jednoduchej zmeny geometrie rotora podľa požadovaných výstupných parametrov zariadenia. Takáto konštrukcia má v porovnaní s Griggsovým ohrievačom nižšiu hmotnosť, jednoduchšiu montáž a nižšie výrobné náklady. Ľahký rotor umožňuje vyššie otáčky a tým pádom zvýšenú tvorbu kavitačných bublín v zariadení. V porovnaní s Griggsovým zariadením vykazuje táto varianta kavitačného ohrievača vyššiu efektívnosť v širšom pracovnom rozsahu. Patent uvádza, že kvapalina privádzaná do pracovného priestoru vstupom umiestneným v osi rotora je nútená prechádzať viacerými kavitačnými zónami a podobne ako v odstredivom radiálnom čerpadle je

kvapalina urýchľovaná radiálne smerom k výstupu umiestnenom kolmo na os otáčania rotora. Podľa počtu a usporiadania dier na perforovanom disku je možné konvertovať zariadenie na generátor pary [8].



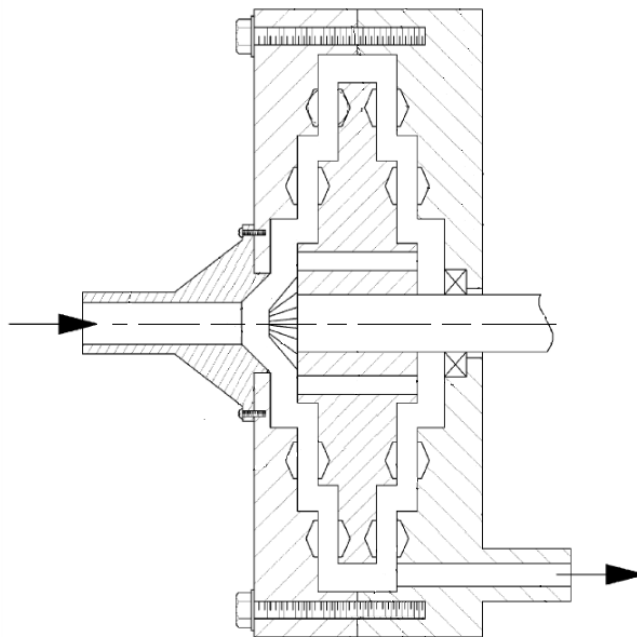
Obr. 4 Zariadenie na ohrev tekutín C. Thoma 2005 [8]

V patente sa nenachádzajú žiadne informácie o charakteristických rozmeroch perforovaného disku a ani žiadne bližšie informácie o vstupno-výstupných parametroch tohto kavitačného ohrievača [8].

2.3. Vysoko účinný ohrievač používajúci energiu vákua – Chang [1]

Zariadenie patentované v Spojených štátoch amerických Kórejčanom Tae-bong Changom v roku 2010. Vynálezca zariadenie prezentuje ako vysoko účinný ohrievač, ktorý nevytvára svojou prevádzkou žiadne škodliviny znečisťujúce životné prostredie. Zariadenie bolo konštruované s ohľadom na jednoduchosť, nízku výrobnú cenu a ľahkú údržbu. Ohrievač sa skladá z rotora uloženého letmo na hriadeli a prírub. Rotor v tvare odstupňovaného disku má na čelných plochách vyvítané plytké slepé diery, ktoré pri otáčaní generujú v kvapaline turbulentné prúdenie. Rotor sa otáča v dutine pracovného priestoru ohrievača, tvoreného prírubami, ktorý má tvar odstupňovaného valca. Prírubby majú, rovnako ako rotor, na vnútorných čelných plochách plytké slepé diery.

Pracovná látka vchádza do zariadenia vstupným otvorom umiestneným v osi. Voda je v zariadení usmernená urýchľovacou jednotkou, umiestnenou na konci hnacej hriadele. Urýchľovacia jednotka napomáha k lepšej cirkulácii vody v pracovnom priestore zariadenia.



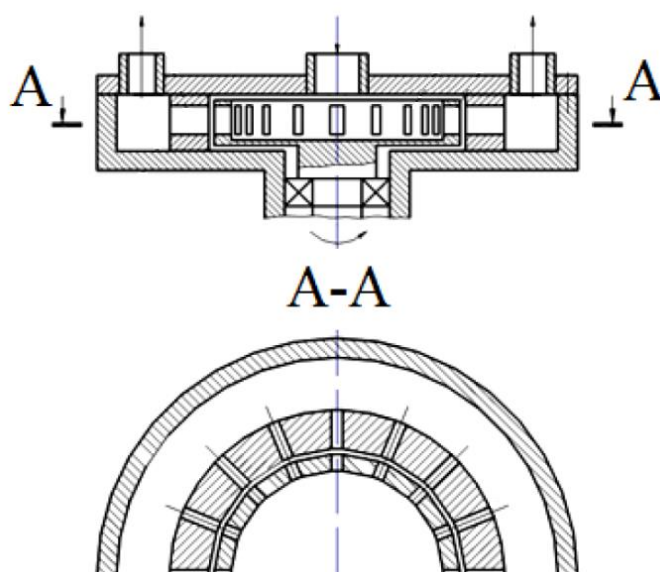
Obr. 5 Vysoko účinný ohrievač využívajúci energiu vákua T. Chang 2010 [1]

Merania uvedené v patente boli realizované v hydraulickom okruhu s objemom pracovnej látky (vody) 2100 litrov. Zariadenie nedokáže vodu samostatne prečerpávať, a preto bol nútený obeh realizovaný použitím čerpadla. Ohrievač bol počas meraní poháňaný motorom s výkonom 55 kW. Merania prebiehali po dobu jednej hodiny a vstupno-výstupné hodnoty boli odčítavané v 10 minútových intervaloch. Patent uvádza, že priemerná účinnosť tohto zariadenia má hodnotu približne 109% [1].

Vynálezca v patente neprezentuje žiadne detaily meraní tohto zariadenia ani použité postupy pri výpočte účinnosti. Preto je ťažké pokladať výsledky meraní, z dôvodu platnosti druhého termodynamického zákona, za dôveryhodné.

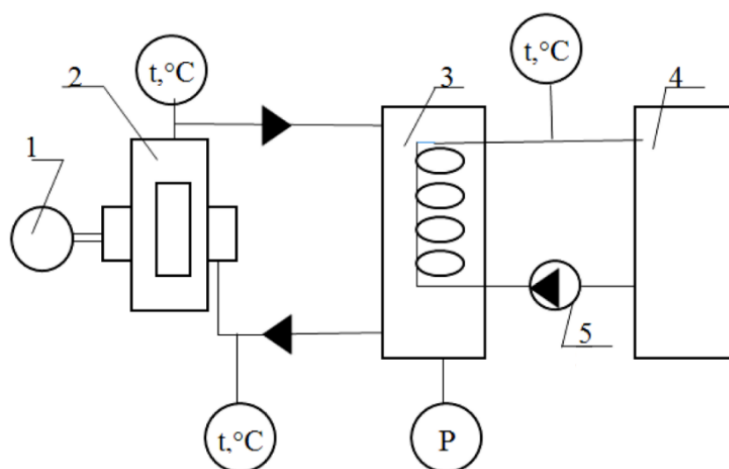
2.4. Rotačné impulzné zariadenie RIA [4, 11]

Rotačné impulzné zariadenie vzniklo pre potreby decentralizovaného vykurovania budov slúžiacich na obytné alebo priemyselné účely. Ako je možné vidieť na Obr. 6 zariadenie má, podobne ako Thomova verzia ohrievača, rotor uložený na hriadeli letmo a vstupný otvor pre pracovnú látku je umiestnený v osi rotora. Generátor kavít je zostavený z rotorovej a statorovej časti, ktoré sú obe uložené v pracovnom priestore stroja. Rotor je umiestnený na hriadeli a jeho pracovná časť je tvorená obručou s priechodnými dierami, ktoré smerujú radiálne od osi otáčania. Stator, rovnako ako rotor, je jednoduchá obruč s rovnakým počtom dier ako rotor. Počas otáčania rotora sa kanály v rotorovej a statorovej časti periodicky prekrývajú. Keď sú diery blokované, voda nachádzajúca sa v rotorovej časti je odstredivými silami stláčaná. Tlak v kvapaline sa po následnom otvorení kanálov zníži za vzniku tlakového impulzu, ktorý expanduje do statorového kanálu. Po následnom uzatvorení kanálov je tekutina v statorových kanáloch zotrvačnými silami vytláčaná von. Tieto zotrvačné sily vytvárajú v kvapaline šmykové napätia a následnú kavitáciu. Pracovný tlak v zariadení je relatívne nízky a neprekračuje 4-6 barov. Priemery rotora sa pohybujú medzi 150-250 mm a pracovné otáčky sú stanovené na 3000 min^{-1} . Vôľa medzi rotorom a statorom je približne 3 milimetre [11].



Obr. 6 Rotačné impulzné zariadenie [4]

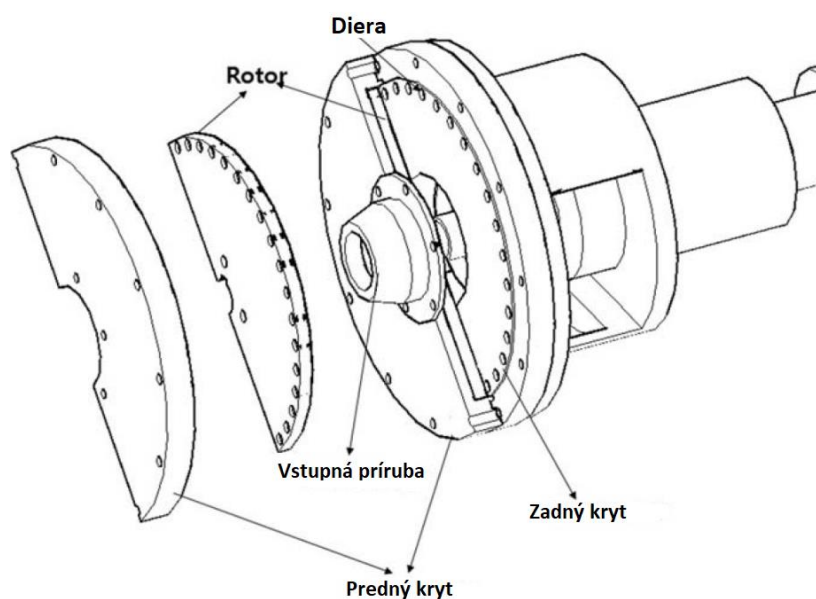
V práci [4] boli prezentované merania tohto kavitačného ohrievača zapojeného do systému zobrazeného na Obr. 7. Merania prebiehali v dvoch fázach. V prvej fáze sa meral kavitačný ohrievač odpojený od výmenníku a zásobníku vody. V druhej fáze bol meraný systém ako celok. V oboch fázach boli merané vstupno-výstupné parametre, ako napríklad teplota na vstupe/výstupe ohrievača a výmenníka, objemový prietok pracovnej látky cez výmenník, výkon elektromotora a čas. Experiment v oboch prípadoch prebiehal v uzavretom systéme s celkovou hmotnosťou ohrievaného média 70 kilogramov, v prvej fáze a 400 kilogramov v druhej. Pri výpočte účinnosti je v tomto experimente najdôležitejší čas, za ktorý sa príslušný objem vody ohrial na stanovenú teplotu. Účinnosť tohto kavitačného ohrievača, nameraná počas prvej fázy experimentu, bola $\eta_1=63,6\%$. V prípade merania v druhej fáze experimentu, so zapojeným výmenníkom tepla a zásobníkom vody, bola nameraná účinnosť kavitačného ohrievača $\eta_2=76\%$.



Obr. 7 Schéma zapojenia RIA v decentralizovanom tepelnom systéme. 1- elektromotor AIR-160S2, $P=15\text{kW}$, $n=2930\text{ min}^{-1}$; 2-RIA; 3- tepelný výmenník; 4- zásobník vody, objem-400 l; 5- čerpadlo YBC 25/6 [4]

2.5. Kavitačný tepelný generátor [9, 12]

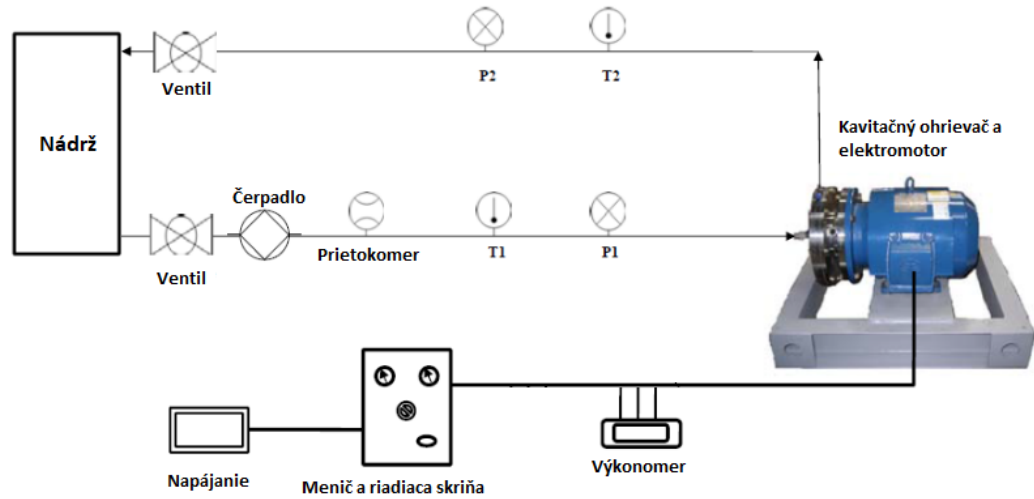
Kavitačný ohrievač tejto konštrukcie, popisovaný v článku [12], ktorý bol vydaný v roku 2011, je poháňaný elektromotorom s výkonom 15 alebo 55 kW. Zariadenie, zobrazené na Obr. 8, ohrieva pracovnú látku kavitačným generátorom, ktorý sa skladá z rotorovej a statorovej časti. Rotorovú časť tvorí disk s dierami na čelách s priemerom 10 mm a celkovým priemerom disku 260 mm. Stator je tvorený krytmi, ktoré majú z vnútra vyvrtané diery uložené v rovnakej vzdialenosti od osi ako diery na rotore. Priestor medzi predným čelom a krytom je 2.5 mm. Zadný kryt je od rotora vzdialený 3 mm. Podobne ako zariadenie patentované C. Thomom má aj tento kavitačný ohrievač mnoho výhod spojených s jednoduchou konštrukciou generátora kavít. Najväčšou výhodou je použitie rotora v tvare disku s relatívne malým počtom dier. Takýto rotor je ľahký a jednoducho vyrobiteľný, to znižuje celkovú výrobnú cenu a zároveň sa pri výrobe spotrebuje menšie množstvo energie, čo je z ekologického hľadiska výhodné.



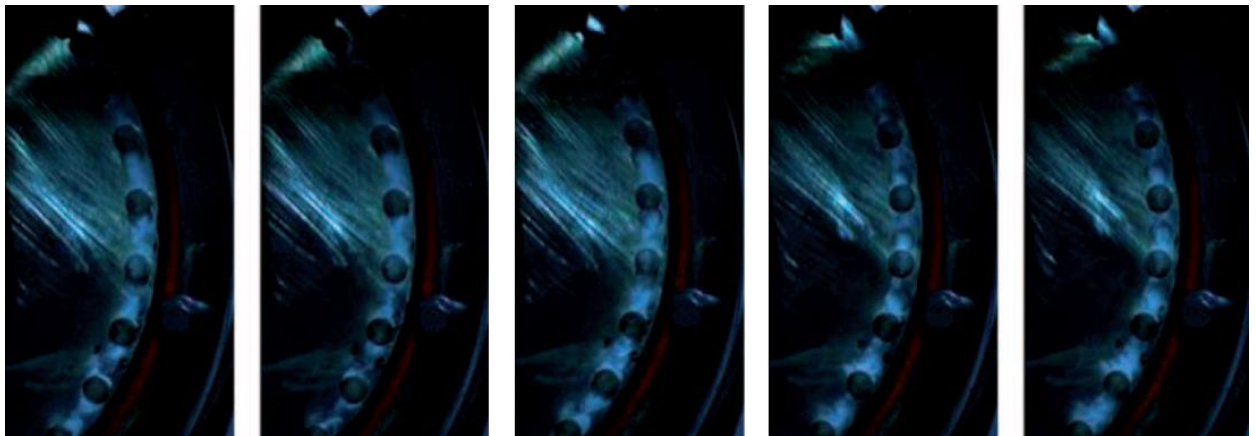
Obr. 8 Kavitačný tepelný generátor [12]

Experimentálne overenie funkčnosti tohto zariadenia bolo vykonávané v systéme, ktoré je zobrazené na Obr. 9. Zariadenie bolo osadené snímačmi tlaku a teploty na vstupe a výstupe, prietokomerom a wattmetrom slúžiacim na meranie výkonu elektromotora. Cirkulácia pracovnej látky (vody) je zabezpečená čerpadlom. Pracovné otáčky kavitačného ohrievača sa počas meraní pohybovali v rozsahu $2100\text{--}3600\text{ min}^{-1}$ a pracovný tlak v rozsahu 1 až 3 bary.

Z výsledkov meraní vyplýva, že tepelná účinnosť opísaného zariadenia úzko súvisí so vstupným tlakom a otáčkami rotora. Vypočítané hodnoty kavitačného a Reynoldsovho čísla pre jednotlivé pracovné body naznačujú, že pri voľbe pracovného bodu s nízkym kavitačným ($\approx 0,2$) a Reynoldsovým číslom približne 30 000 (kapitola 5.) sa účinnosť môže vyšplhať na 88-89 %. Následným meraním, s použitím 55 kW motora a jemne upravenou geometriou rotora, bola v pracovnom bode s otáčkami 3550 min^{-1} a vstupným tlakom 3,01 bar nameraná účinnosť až 94,43 %.



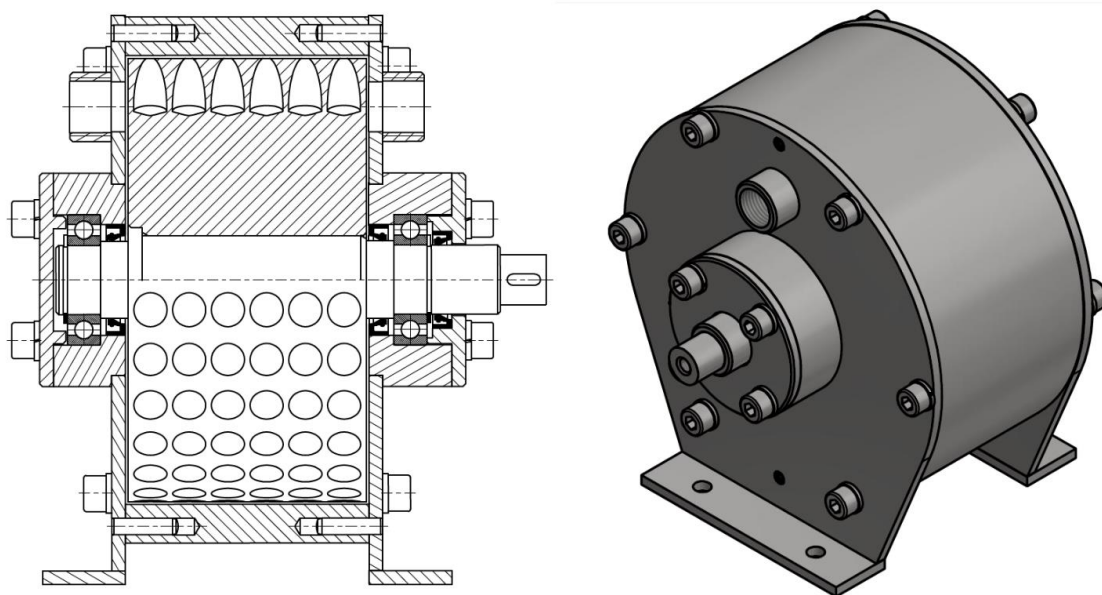
Obr. 9 Schéma zapojenia kavitačného tepelného generátora [12]



Obr. 10 Vizualizácia prúdenia vysokorychlostnou kamerou dokazujúca prítomnosť kavitácie na disku, $n = 3600 \text{ min}^{-1}$; 14 000 fps [12]

3. Návrh konštrukcie kavitačného ohrievača

Kavitačný ohrievač/kotel (Obr. 11) bol navrhovaný s ohľadom na čo najjednoduchšiu konštrukciu a pri návrhu sme vychádzali z Griggsovho zariadenia patentovaného v roku 1993 [8]. Zariadenie pozostáva z dvoch prírub, bubna, rotora a hriadele. Jednotlivé dielce sú vyrobené z austenitickej nerezovej ocele STN 17 248 s medzou pevnosti $R_m = 520 - 720$ MPa a zmluvnou medzou kĺzu $R_{p0,2} = 220$ MPa s veľmi dobrou odolnosťou voči korózii a vynikajúcou zvariteľnosťou [13]. Stroj (Príloha 1) bol navrhovaný a vyrábaný s ohľadom na maximálne povolené otáčky $n = 6000 \text{ min}^{-1}$. Pracovný priestor kavitačného ohrievača je tvorený prírubami a bubnom, ktorý je priskrutkovaný k prírubám dvanástimi skrutkami so závitom M8. Vzájomné polohovanie bubna voči obojstranným prírubám je realizované pomocou štyroch kolíkov s priemerom 6 mm. Pracovný priestor je v spojení príruby a bubna, tesnený pomocou silikónového tesnenia.



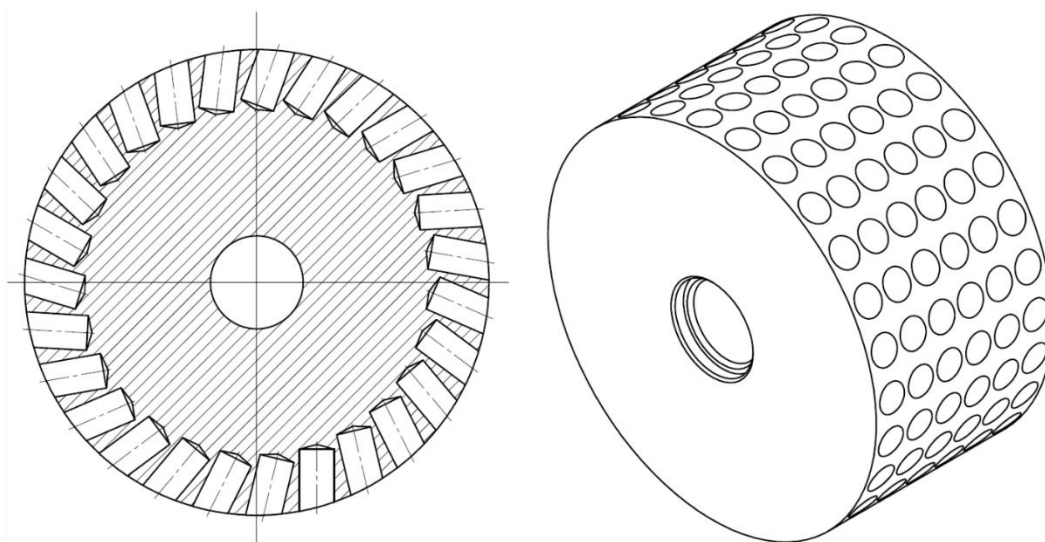
Obr. 11 Navrhnutý kavitačný ohrievač zobrazený v reze a v axonometrii

Prírubby sú zvarence vzniknuté spojením steny, nátrubku, pätky a ložiskovej skrine. Prírubby sú navrhnuté tak, aby sa záťaž od rotora na ložiská rozložila rovnomerne. Voda vchádza do pracovného priestoru zariadenia nátrubkom, uloženým na stene, v ktorom je navrtaná diera s trúbkovým závitom s priemerom $\frac{1}{2}$ vo vzdialenosti 62 mm od osi. Pätky slúžia na priskrutkovanie stroja k základovému telesu pomocou štyroch dier s priemerom 9 mm. Ložiskové skrine nie sú pre obe príruby totožné, a preto rozdeľujeme príruby na pravú a ľavú. Pravá ložisková skriňa je predĺžená o niekoľko milimetrov kvôli hriadeľovému tesneniu – guferu, ktoré zabráňuje nečistotám vstúpiť do skrine skrz veko s dierou pre hriadeľ, ktorý cez ňu prechádza von. Ložiskové skrine sú zabezpečené voči vniknutiu pracovnej látky dvojicou hriadeľových tesnení. Ide o jednoduché konštrukčné prevedenie, ktoré má jeden výrazný nedostatok – nemožnosť zmeny tlaku v pracovnom priestore. Guferá sa pod vplyvom tlaku výrazne deformujú a strácajú tak tesniacu schopnosť. Pracovná látka (voda) sa tak dostane do styku s ložiskami a zničí ich. Obe skrine sú zakrytované párom viek, vyrobených z konštrukčnej ocele a spojené s ložiskovými skriňami pomocou ôsmich skrutiek.

Rotor je v pracovnom priestore s objemom $V = 0,45$ l uložený tak, že v každom bode je od stien prírub a bubna vzdialený 1 mm. Následkom toho sa väčšina objemu pracovného priestoru nachádza v oblasti tvorby kavitácie s minimálnym objemom, v ktorom sa kavitácia nevyskytuje. Nevýhodou je potreba použitia rotora z plného materiálu a s tým spojená celková hmotnosť zariadenia a relatívne dlhý čas potrebný na ustálenie výstupných parametrov. Všetky skrutkové spoje zariadenia sú z dôvodu vibrácií zabezpečené voči uvoľneniu pomocou pružných podložiek.

3.1. Rotor

Generátor kavit v kavitačnom ohrievači tejto konštrukcie je reprezentovaný valcovým rotorom a statorom tvoreným vnútornou plochou bubna bez nepravidelností. Kavity vznikajú v dierach, ktoré sú umiestnené na rotačnej ploche rotora. Keďže neexistujú informácie o optimálnej geometrii rotora a dier, boli tieto parametre ponechané na vlastnej voľbe konštruktéra. Valcový rotor, zobrazený na Obr. 12, bol volený s priemerom $D = 160$ mm a dĺžkou $l = 86$ mm. Rotor má tak pri maximálnych otáčkach 6000 min^{-1} obvodovú rýchlosť $v_{\text{max}} = 50,26 \text{ ms}^{-1}$. Na rotore bolo navrhnutých 6 radov dier s 27 dierami v jednom rade. Dier, s priemerom 12 mm a strednou hĺbkou 20 mm, je tak na rotore dohromady 162. Diery boli zároveň vyosené o určitý uhol, čo má podľa patentu priaznivý účinok na efektivitu tvorby kavit.



Obr. 12 Rotor kavitačného ohrievača zobrazený v reze a axonometrii

Kavitácia vzniká v dierach rotora počas prevádzky vplyvom odstredivej sily pôsobiacej na vodu nachádzajúcu sa v dierach rotora. Táto sila vytvára v kvapaline šmykové napätia a po prekročení hodnoty tlaku sýtej pary sa začnú generovať kavity. Rozsah tlakov, pri ktorých vzniká kavitácia je daný teplotou ohrievaného média. Následne vzniknutá oblasť nízkeho tlaku v kavite nasaje do diery pracovnú látku a cyklus sa uzatvára. Počas nasávania kavita kolabuje a zaniká implóziou pri ktorej je plyn v kavite adiabaticky stláčaný a ohrievaný. Takto vzniknuté teplo je následným vedením prenášané do pracovnej látky.

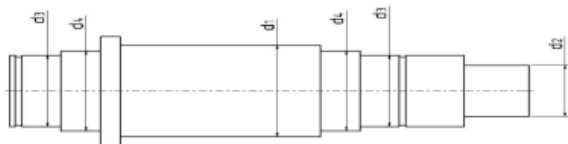
Spojenie hriadele a rotora bolo realizované pomocou tlakového spoja namiesto často používaného spojenia tesným perom. Nevýhodou spojenia tesným perom je vychýlenie ťažiska mimo os rotácie, čo by sa počas chodu vo vysokých otáčkach prejavovalo vibráciami. Druhou nevýhodou tohto typu spojenia je nutnosť poistenia voči posunutiu v axiálnom smere. Spojenie

tlakom nie je nutné poistiť voči posunutiu a zároveň sa ťažisko mimo os otáčania dostane len minimálne. Nevýhodou tohto spoja je jeho nerozoberateľnosť.

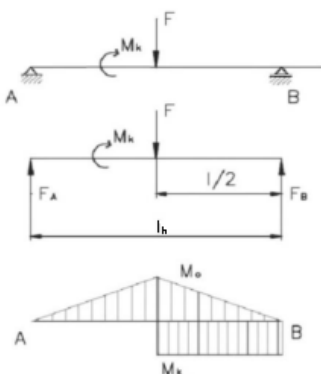
3.2. Hriadeľ

Pri návrhu hybnej hriadele kavitačného ohrievača sa zohľadňovali tieto faktory: jednoduchosť a spoľahlivosť s ohľadom na relatívne malé rozmery zariadenia. Hriadeľ pozostáva zo štyroch dôležitých priemerov, ktoré sú odstupňovane podľa konštrukčnej zásady: $d_1 > d_4 > d_3 > d_2$. Na priemere $d_1 = 32$ mm je uložený rotor, nasledujúce priemery $d_4 = 28$ mm sú brúsené na drsnosť $Ra = 0,2$ μm , z dôvodu hriadeľových tesnení, ktoré sú na nich uložené. Priemery $d_3 = 25$ mm slúžia na uloženie ložísk. Guľôčkové jednoradové ložiská sú na hriadeľi poistené voči axiálnemu posunutiu poistnými krúžkami. Na hriadeľovom čape s priemerom $d_2 = 18$ mm je uložená spojka, ktorou sa prenáša výkon z elektromotora s výkonom $P = 22,4$ kW. V tejto podkapitole uvedieme kontrolné výpočty hriadele voči medznému stavu pružnosti.

Analytický výpočet hlavných priemerov hriadele:



$P := 22400 \text{ W}$	Výkon elektromotora
$d_1 := 32 \text{ mm}$	
$d_2 := 18 \text{ mm}$	
$d_5 := 11 \text{ mm}$	Priemer diery na priemere d_2
$n_{max} := 6000 \text{ s}^{-1}$	Maximálne otáčky elektromotora
$m := 10,2 \text{ kg}$	Hmotnosť rotora
$l_2 := 118 \text{ mm}$	
$g := 9,81 \text{ ms}^{-2}$	
$Rm := 520 \text{ MPa}$	Medza pevnosti ocele 17 248
$Rp_{0,2} := 220 \text{ MPa}$	Zmluvná medza kizu ocele 17 248
$k := 1,5$	Bezpečnosť voči MSP
$\alpha := 2,5$	Súčiniteľ koncentrácie napätia



Maximálny ohybový moment:

$$F_g := m \cdot g = 100,06 \text{ Nm}$$

$$M_{max} := F_g \cdot \frac{l_2}{2} = 5903,658 \text{ Nmm}$$

Kvadratický modul prierezu d_1 v ohybe:

$$W_{o1} := \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} = 3216,99 \text{ mm}^3$$

Napätie v ohybe na priemere d_1 :

$$\sigma_o := \frac{M_{max}}{W_{o1}} = 1,83 \text{ MPa}$$

Redukované napätie v ohybe podľa podmienky HMM:

$$\sigma_{ored} := \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau_{k1}^2} = 9,771 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ored} = 9,771 \text{ MPa} < \frac{Rp_{0,2}}{k} = 146,6 \text{ MPa} \quad - \text{vyhovuje}$$

Krútiaci moment pri maximálnych otáčkach:

$$M_k := \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{max}}{60}} = 35,650 \text{ Nm}$$

$$M_k := 35650 \text{ Nmm}$$

Kvadratický modul prierezu d_1 v krute:

$$W_{k1} := \frac{\pi \cdot d_1^3}{16} = 6433,9818 \text{ mm}^3$$

Napätie v krute na priemere d_1 :

$$\tau_{k1} := \frac{M_k}{W_{k1}} = 5,54 \text{ MPa}$$

Kontrola priemeru d_2 :

Kvadratický modul prierezu d_2 v krute:

$$W_{k2} := \frac{\pi \cdot \left((d_2 - t_1)^4 - d_s^4 \right)}{16 \cdot (d_2 - t_1)} = 690,797 \text{ mm}^3$$

Napätie v krute na priemere d_2 :

$$\tau_{k2max} := \frac{M_k}{W_{k2}} \cdot \alpha = 129 \text{ MPa}$$

$$\tau_{k2max} = 129,8 \text{ MPa} > \frac{Rp_{0,2}}{k} = 146,6 \text{ MPa} \quad \text{-vyhovuje}$$

Kontrola tesného pera:

Na priemere d_2 sa nachádza PERO 4x4x12 STN 02 2562, ktoré je nutné skontrolovať na otláčenie.



$$h := 4 \text{ mm}$$

$$b := 4 \text{ mm}$$

$$l := 12 \text{ mm}$$

$$t_{II} = 1,6 \text{ mm}$$

$$p_D := 0,8 \cdot 150 = 120 \text{ MPa}$$

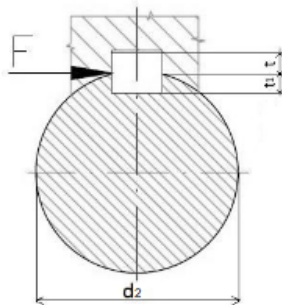
Výška pera

Šírka pera

Dĺžka pera

Hĺbka drážky v náboji

Dovolený tlak pre oceľový náboj zatažený staticky



$$F := \frac{2 \cdot M_k}{d_2} = 3961,1 \text{ N}$$

$$S := (l - b) \cdot t_1 = 12,8 \text{ mm}^2$$

$$p := \frac{F}{S} = 309,4618 \text{ MPa}$$

$$p = 309,4618 \text{ MPa} > p_D = 120 \text{ MPa} \quad \text{- nevyhovuje}$$

Maximálny dovolený tlak p_D nesmie byť kvôli bezpečnosti prekročený a preto je nutné vypočítať maximálny krútiaci moment, ktorý môže hriadeľ prenášať.

$$F_{max} := p_D \cdot S = 1536 \text{ N}$$

Maximálny krútiaci moment na hriadeľi:

$$M_{kmax} := \frac{F_{max} \cdot d_2}{2} = 13824 \text{ Nmm} = 13,824 \text{ Nm}$$

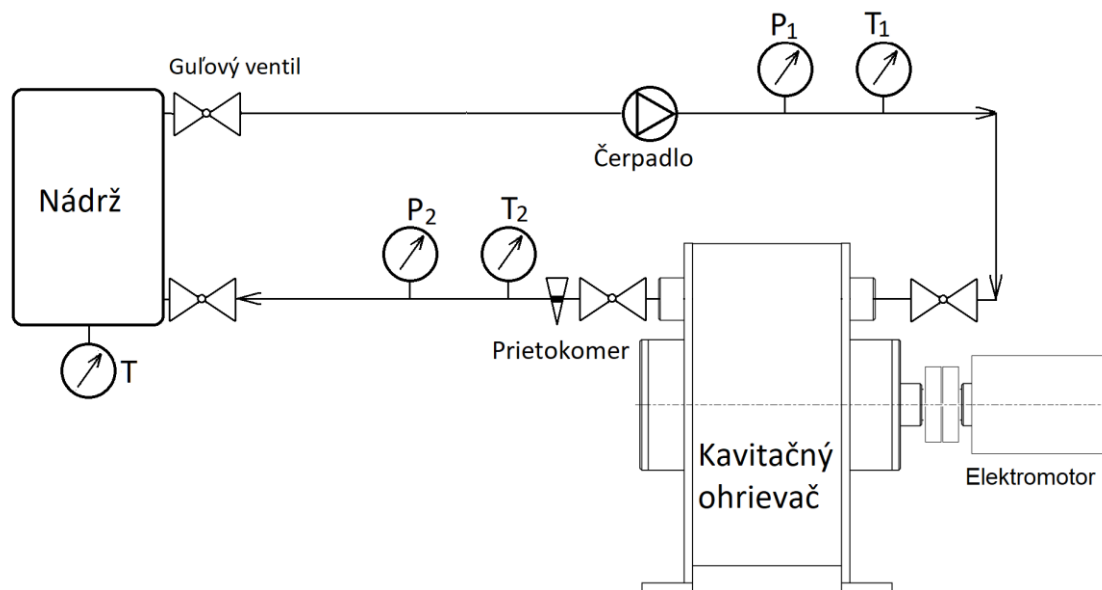
Pevnostné výpočty uvedené v tejto podkapitole ukázali, že prevádzka popísaného ohrievača je možná, ale zároveň je potrebné sledovať veľkosť krútiaceho momentu na hriadeľi. V laboratórnych podmienkach je zariadenie bezpečné v prípade, že obsluha bude pred experimentom riadne poučená o tomto potenciálnom limitujúcom faktore.

4. Návrh a priebeh experimentu

Experimentálne overenie funkčnosti kavitačného ohrievača je základným cieľom tejto práce, a preto mu je kladená náležitá pozornosť. Počas meraní sme sa sústredili hlavne na určenie hodnôt, ktoré sú dôležité pre výpočet termálnej účinnosti kavitačného ohrievača.

4.1. Schéma zapojenia

Kavitačný ohrievač bol meraný v uzavretom okruhu (Obr. 13), ktorý sa skladá z nádrže, čerpadla, dvojice tlakomerov, teplomerov a kalorimetra. Guľové ventily slúžia na jednoduchú manipuláciu počas montáže a demontáže tohto okruhu.



Obr. 13 Schéma zapojenia kavitačného ohrievača

Teplota vody v nádrži bola meraná odporovým teplomerom (T) PTP 55, ktorý ma rozsah $-25 - 100^{\circ}\text{C}$ a presnosť $\pm 0,3\%$ z celkového rozsahu. Tlakomery P_1 a P_2 sú priemyslové snímače tlaku DMP 331, merajúce absolútny tlak v rozsahu $0 - 2,5$ bar s presnosťou $\pm 0,25\%$ rozsahu. Kalorimeter EW 447 firmy Honeywell je v schéme prezentovaný prietokomerom a snímačom teploty T_2 . Rozsah vstavaného prietokomeru je $6 - 1200$ l/h. EW 447 je vybavený odporovým teplomerom Pt 500. Merané veličiny prietoku a teploty sú následne vyhodnocované vstavaným mikropočítačom. Kalorimeter spolu so snímačom tlaku P_2 sú od výstupného otvoru kavitačného ohrievača vzdialené vo vzdialenosti desaťnásobku priemeru. Kavitačný ohrievač je poháňaný elektromotorom s výkonom $22,4$ kW a otáčkami $n = 5000$ min^{-1} s možnosťou regulácie otáčok. Dodávaný krútiaci moment je sledovaný dynamometrom. Všetky merané veličiny boli následne spracovávané pomocou programu LABview a zapisované do tabuľky (Príloha 2).

4.2. Priebeh experimentu

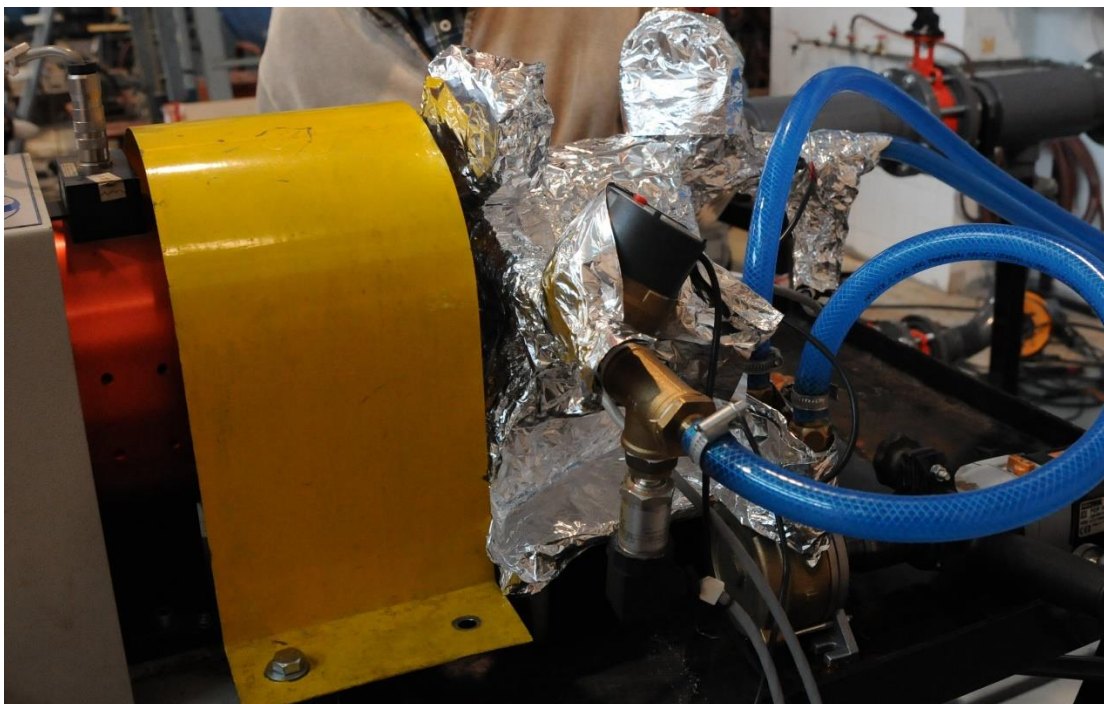
Merania kavitačného ohrievača prebiehali v laboratóriu odboru fluidného inžinierstva V. Kaplana v roku 2017, z dôvodu experimentálneho overenia funkčnosti tohto stroja. Sledované parametre boli teploty a tlaky na vstupe a výstupe zariadenia a objemový prietok pracovnej látky v systéme. Ďalšími sledovanými parametrami boli otáčky a krútiaci moment na hriadelí kavitačného ohrievača. Následne sa z nameraných hodnôt vyhodnocoval príkon a výkon

v podobe tepla, rozdiel teploty a tlaku medzi vstupom a výstupom a tepelná účinnosť zariadenia. Elektrické príkony elektromotoru a čerpadla potrebné, na vyhodnotenie celkovej tepelnej účinnosti zapojenia, neboli sledované. Po vzájomnej dohode bol navrhnutý experiment, ktorý bol rozdelený na 2 fázy.

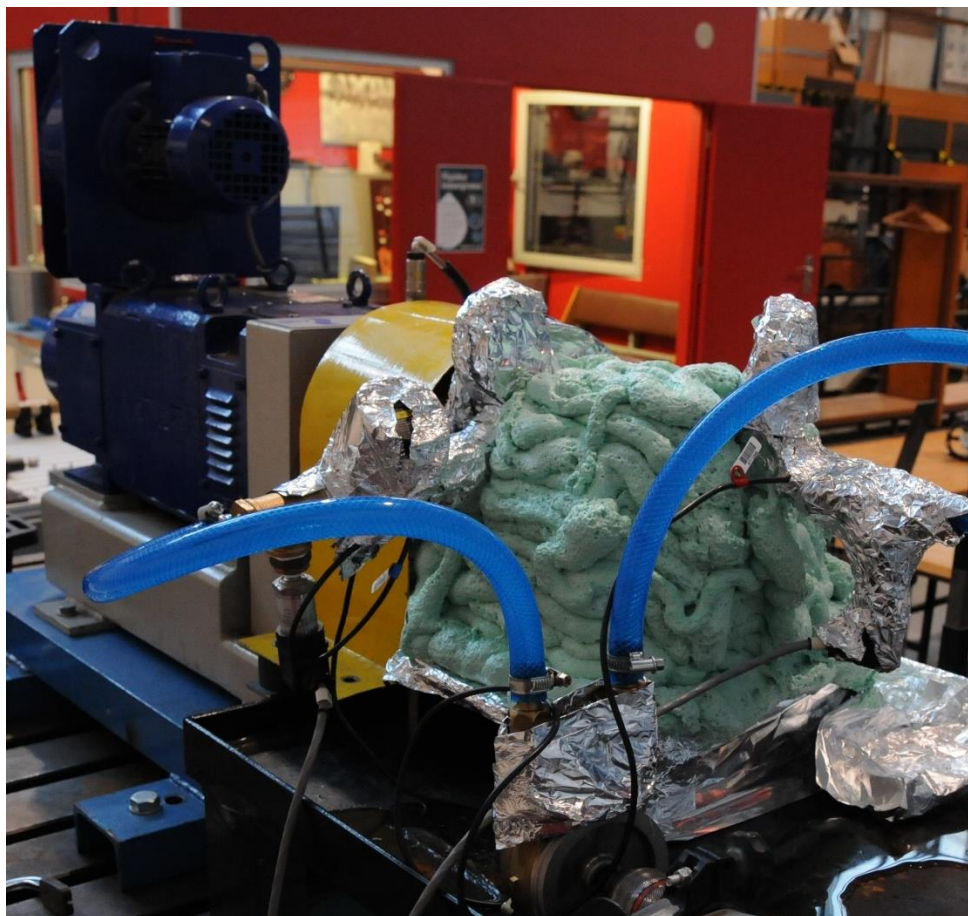
V prvej fáze sa merali hodnoty na vstupe a výstupe kavitačného ohrievača pre priemerný prietok $Q_{V1} = 0,058 \text{ m}^3/\text{h}$. Následne boli sledované hodnoty pre otáčky rotora kavitačného ohrievača v rozsahu $3000 - 5000 \text{ min}^{-1}$ s odstupňovaním po 500 min^{-1} . Takto definované pracovné body boli merané viackrát, po dobu niekoľkých minút, z dôvodu presnosti merania a zotrvačnosti systému. Teplota na vstupe kavitačného ohrievača mala priemernú hodnotu počas prvej fázy $16,9^\circ\text{C}$.

Druhá fáza experimentu prebiehala obdobne ako prvá fáza. Pracovné body však boli určené prietokom s priemernou hodnotou $Q_{V2} = 0,16 \text{ m}^3/\text{h}$ a otáčkami na rotore v rozsahu $2000 - 5000 \text{ min}^{-1}$. Pracovné body definované otáčkami v druhej fáze experimentu, nasledovali zostupne za sebou, z dôvodu približného určenia tepelnej zotrvačnosti stroja. Teplota vody vstupujúcej do zariadenia bola počas celého merania približne $17,21^\circ\text{C}$.

Na záver experimentu boli merané hodnoty pre pracovné body určené prietokom $Q_{V2} = 0,16 \text{ m}^3/\text{h}$ a otáčkami 5000 a 5500 min^{-1} , merané vzostupne. Vstupná teplota vody mala priemernú hodnotu $17,9^\circ\text{C}$. Dôvodom tohto posledného merania je relevantnosť výsledkov pri určovaní tepelnej účinnosti ohrievača.



Obr. 14 Kavitačný ohrievač zapojený podľa schémy



Obr. 15 Kavitačný ohrievač v zapojení spolu s elektromotorom

5. Vyhodnotenie experimentu

Pri vyhodnocovaní výsledkov experimentu sa určovali závislosti rôznych výstupných veličín na vstupných hodnotách, definujúcich pracovné body. Pracovné body sú definované otáčkami rotora a objemovým prietokom pracovnej látky zariadením.

Prvou sledovanou výstupnou veličinou je výstupný výkon kavitačného ohrievača vo forme tepla. Pri určení tohto výkonu sa vychádzalo z kalorimetrickej rovnice (1), kde hodnoty t_1 a t_2 sú teploty pracovnej látky medzi vstupom a výstupom ohrievača.

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Hmotnosť (m) sa nahradila hmotnostným prietokom (Q_m). Merná tepelná kapacita vody (CH_2O) bola určená ako priemer tabuľkových hodnôt mernej tepelnej kapacity vody, v rozsahu $15 - 60^\circ\text{C}$.

$$Q = Q_m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Hmotnostný prietok (Q_m) sa následne nahradil objemovým prietokom Q_v [m^3/s], vynásobeným hustotou vody na výstupe.

$$Q = Q_v \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3)$$

Tepelná účinnosť ohrievača sa stanovila z rovnice (5). Účinnosť je definovaná ako pomer medzi mechanickou energiou dodávanou elektromotorom (P) a výstupným tepelným výkonom pracovnej látky (Q). Pri výpočte účinnosti sa nebral do úvahy systém ako celok, ale len samotná účinnosť ohrievača, pričom P je príkon ohrievača určený vzťahom (4):

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_k}{60} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Q}{P} \cdot 100 \quad (5)$$

Kavitačné číslo je bezrozmerné podobnostné číslo určujúce tlakové pomery v prúdovom poli. Kavitačné číslo je možné použiť na charakterizáciu kavitácie [2]. Hodnoty tlaku sýtych pár a hustoty boli uvažované pre priemernú hodnotu teploty v pracovnom priestore kavitačného ohrievača. Parameter v_o [m/s] je definovaný ako obvodová rýchlosť rotora v pracovnom bode, určenom otáčkami n (6).

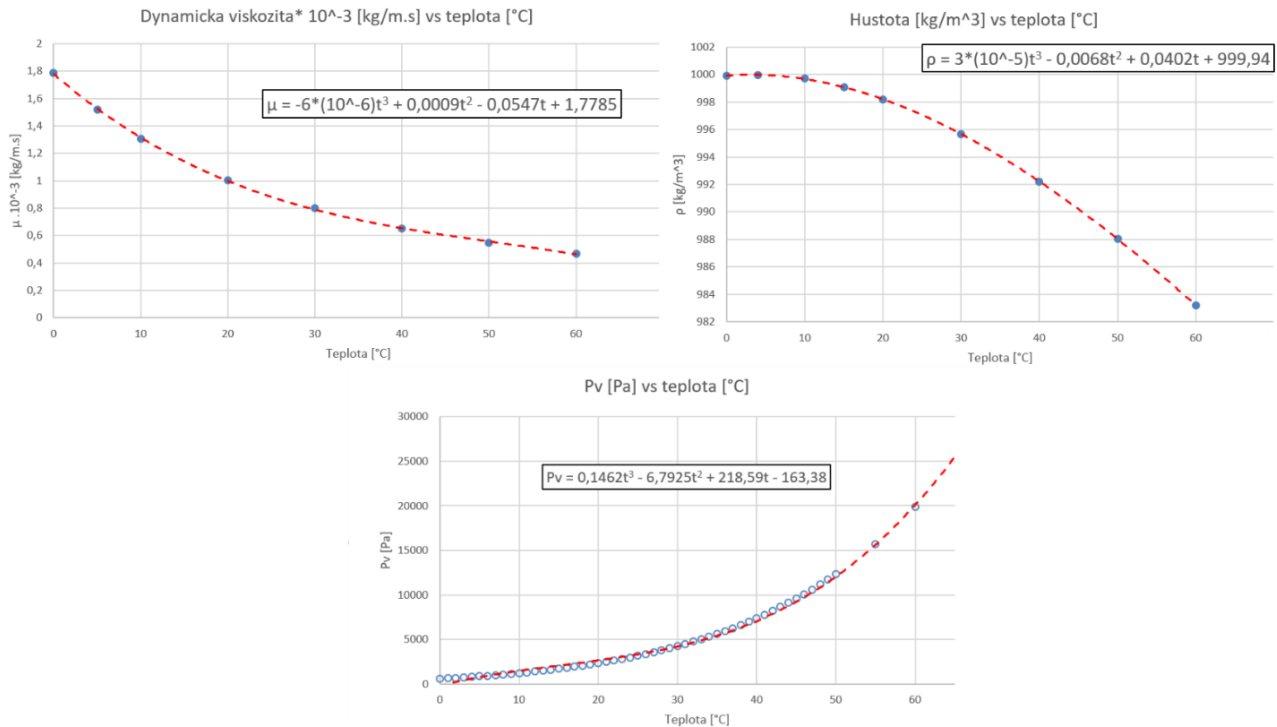
$$v_o = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot (p_1 - p_v)}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot v_o^2} \quad (7)$$

Ďalším sledovaným ukazovateľom je Reynoldsove číslo, definované rovnicou (8). Reynoldsove číslo (Re) je bezrozmerné číslo, ktorého hodnota dáva informáciu o charaktere prúdenia tekutiny. Hodnota D je definovaná ako priemer rotora a μ je dynamická viskozita vody pri priemernej teplote v stroji.

$$Re = \frac{\rho_{H_2O} \cdot v_o \cdot D}{\mu} \quad (8)$$

Hodnoty parametrov tlaku nasýtených pár p_v , hustoty ρ_{H_2O} a dynamickej viskozity μ sa menia v závislosti od teploty. Preto boli z dôvodu presnosti výsledkov sledovaných veličín určované tieto hodnoty, ako polynomicke funkcie tretieho stupňa závislé od teploty. Priebiehy týchto aproximačných funkcií a ich matematické zápisy sú zobrazené na Obr. 16.



Obr. 16 Priebiehy použitých aproximačných funkcií viskozity, hustoty a tlaku nasýtených pár (p_v) vody

5.1. Výsledky experimentu

5.1.1. Závislosť medzi príkonom a výkonom

Pri vyhodnocovaní výsledkov z experimentu, sa ako prvá sledovala závislosť medzi príkonom (P) a výkonom (Q) kavitačného ohrievača. Na Obr. 17 je zobrazený graf závislostí pre prietoky $Q_{V1} = 0,058 \text{ m}^3/\text{hod}$ a $Q_{V2} = 0,16 \text{ m}^3/\text{hod}$. Pre jednoduché vyhodnotenie sa zobrazené hodnoty lineárne aproximovali, ako funkcia výstupného výkonu $Q = f(P)$. Sledovaným parametrom je uhol sklonu týchto priamok, popísaných rovnicami (9, 10), pre ktoré platí, že rovnica (7) patrí hodnotám nameraným pri prietoku Q_{V1} a rovnica (8) prietoku Q_{V2} , pričom uhol sklonu aproximačnej priamky, s hodnotou $\alpha_{\max} = 45^\circ$ odpovedá zariadeniu s účinnosťou 100%. Z tohto dôvodu je hodnota uhla α dobrým ukazovateľom závislosti účinnosti ohrievača od prietoku Q_v .

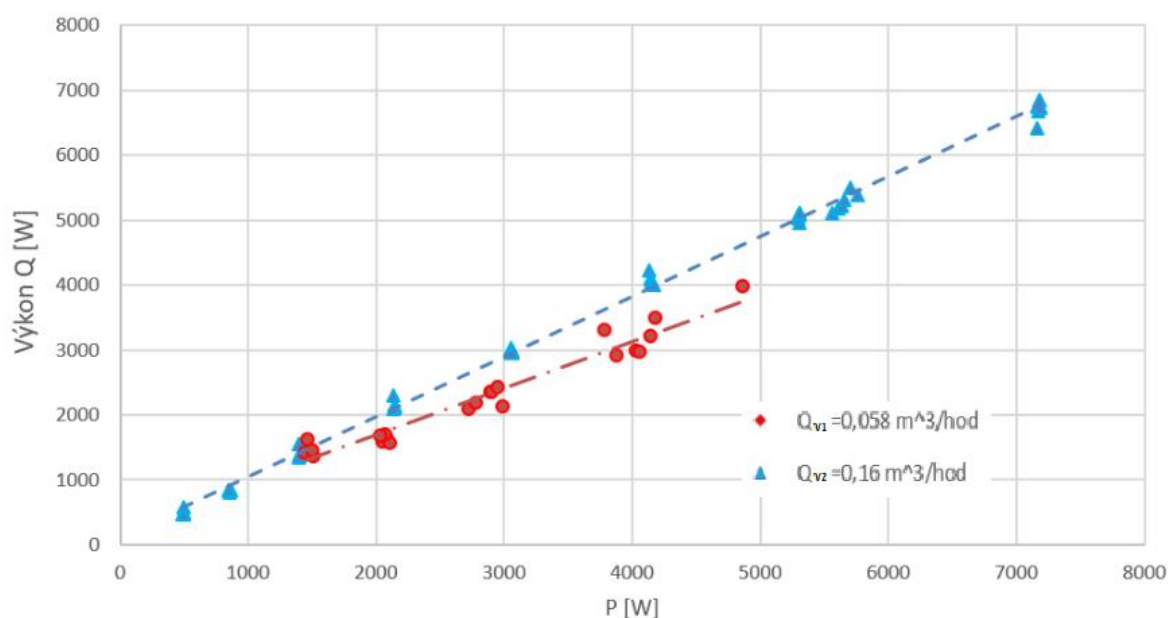
$$Q_1 = 0,7721P + 247,12 \quad (9)$$

$$Q_2 = 0,9265P + 109,88 \quad (10)$$

Uhol sklonu týchto priamok vypočítame deriváciou rovníc (9, 10) podľa P. Výsledkom derivovania je hodnota funkcie tangens uhla α_1 a α_2 , z ktorej následne určíme hodnoty uhla pre obe prietoky:

$$\tan(\alpha_1) = \frac{dQ_1}{dP} = 0,7721 \rightarrow \alpha_1 = 35^\circ 50' \quad (11)$$

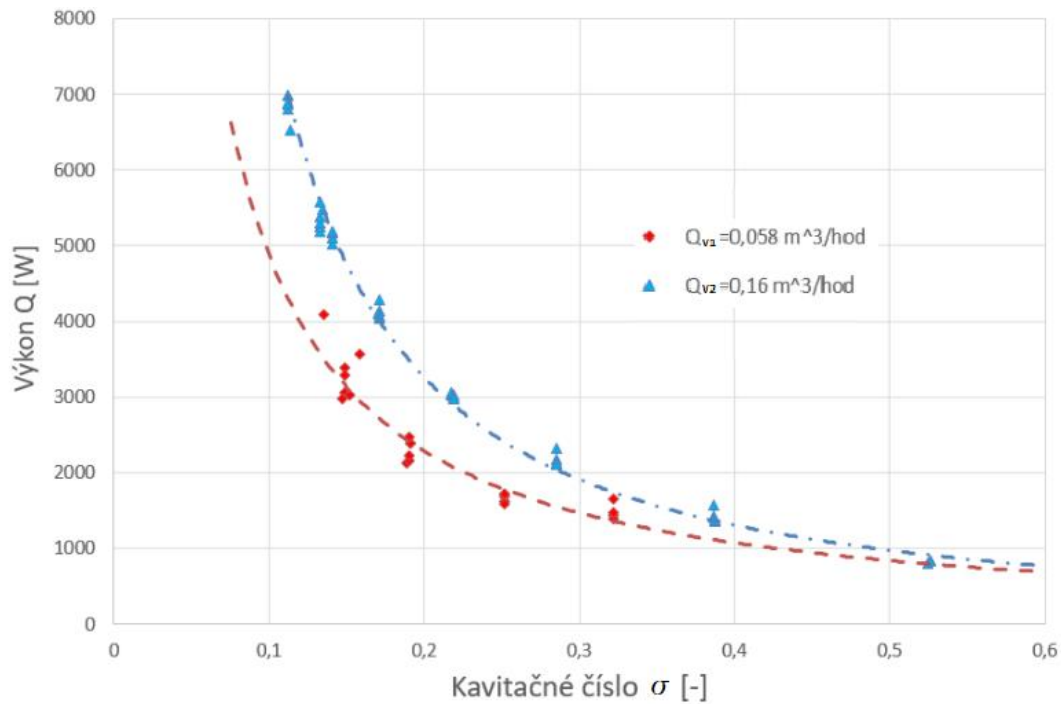
$$\tan(\alpha_2) = \frac{dQ_2}{dP} = 0,9265 \rightarrow \alpha_2 = 42^\circ 49' \quad (12)$$



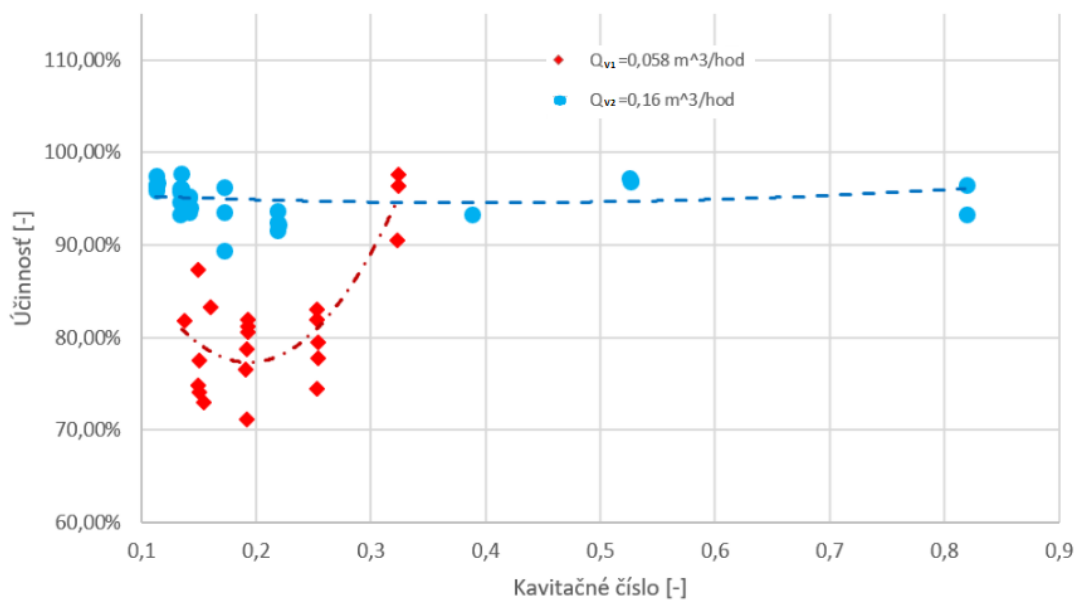
Obr. 17 Graf závislosti príkonu ohrievača (P) od výkonu (Q)

5.1.2. Závislosť príkonu a účinnosti od kavitačného čísla

Pre určenie toho, ako kavitácia súvisí s výkonom ohrievača sa pri vyhodnocovaní experimentu sledovala hodnota výkonu a kavitačného čísla σ pre obe prietoky Q_{v1} a Q_{v2} . Veľkosť kavitačného čísla priamo súvisí s otáčkami rotora a tlakom v stroji. Preto je jedným zo smerodajných ukazovateľov pri určení optimálnych vstupných parametrov.



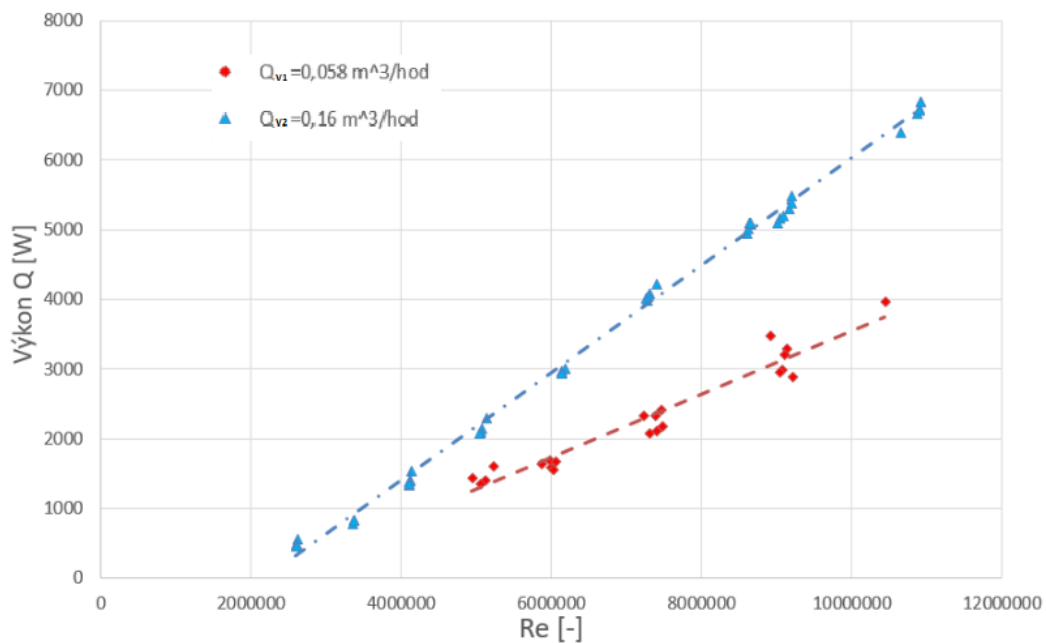
Obr. 18 Graf závislosti výkonu a kavitačného čísla



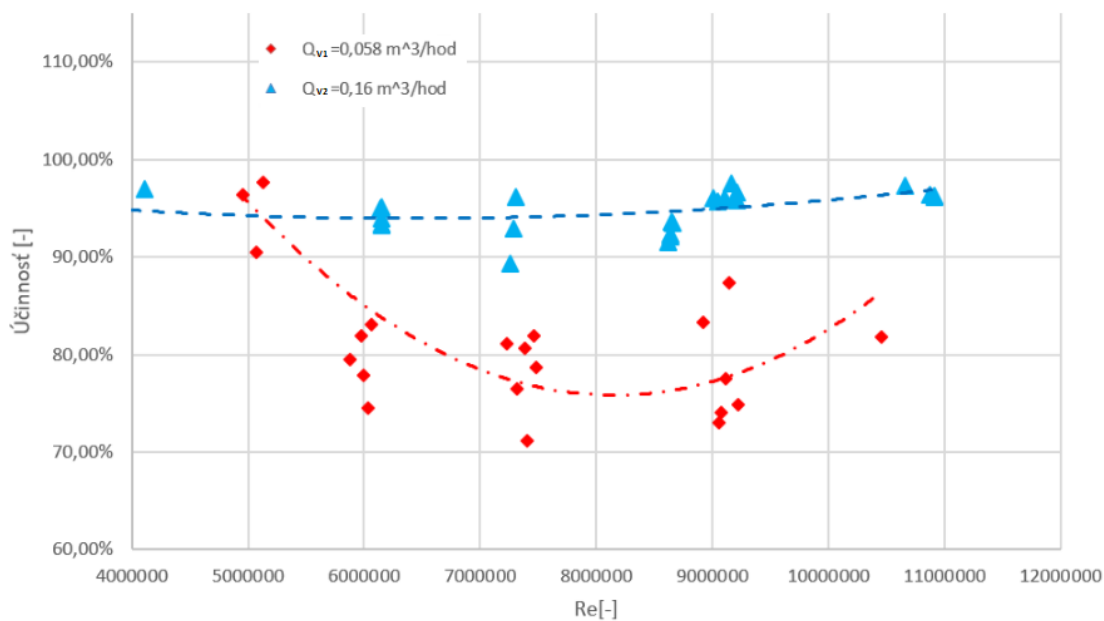
Obr. 19 Graf závislosti účinnosti a kavitačného čísla

5.1.3. Závislosť príkonu od Reynoldsovho čísla

Graf (Obr. 17) zobrazuje závislosť generovaného tepla a Reynoldsovho čísla. V grafe sú tiež znázornené aproximačné priamky pre prietoky Q_{v1} a Q_{v2} . Reynoldsovo číslo je, rovnako ako kavitačné číslo, funkciou závislou od otáčok, a preto je ďalším dôležitým parametrom pri určovaní optimálneho pracovného bodu kavitačného ohrievača.



Obr. 20 Graf závislosti výkonu a Reynoldsovho čísla



Obr. 21 Graf závislosti účinnosti a Reynoldsovho čísla

6. Diskusia

Výsledky experimentu opísané v predchádzajúcej kapitole je nutné zhodnotiť a porovnať s inými zariadeniami. Dôvod porovnania súvisí s určením a konkurencieschopnosti kavitačného ohrievača.

Zo získaných P-Q charakteristík kavitačného ohrievača pre obe merané prietoky je zrejme, že prietok úzko súvisí s účinnosťou zariadenia. Z uhla sklonu aproximačných priamok je možné určiť približnú hodnotu účinnosti. Jednoduchým výpočtom je možné zistiť, že v prvej fáze experimentu bola účinnosť ohrievača $\eta_1 = 79,6\%$. V druhej fáze pri prietoku $Q_{V2} = 0,16 \text{ m}^3/\text{hod}$ účinnosť stúpila na hodnotu $\eta_2 = 95,14\%$. Z toho vyplýva, že pri zvýšení prietoku o $\Delta Q_V = 0,102 \text{ m}^3/\text{hod}$ sa zvýšila účinnosť o 15,54%. Uvedené správanie kavitačného ohrievača dáva podnet pre budúce určenie charakteristiky účinnosti od prietoku. Z tabuľky (Príloha 2) je ale zrejme, že v druhej fáze experimentu boli hodnoty Δt všeobecne nižšie. Príkladom môže byť pracovný bod určený otáčkami $n = 4000 \text{ min}^{-1}$. V prvej fáze experimentu bol rozdiel teplôt približne 34°C , v druhej fáze experimentu sa však pri rovnakých otáčkach pohybovala hodnota Δt okolo hodnoty 16°C . Je preto možné predpokladať, že hypotetické zvyšovanie účinnosti pomocou prietoku bude mať za následok výrazný pokles teploty na výstupe.

Z rovnice (7) a grafu závislosti tlaku nasýtených pár od teploty vyplýva, že hodnota kavitačného čísla úzko súvisí s teplotou a tlakom pracovnej látky. Z grafov (Obr. 18 a 19) je ale zrejme, že tieto charakteristiky nie je imúnne voči zmene prietoku. Z dôvodu konštrukčných limitov meraného stroja nebolo možné detailne určiť súvis medzi hodnotou kavitačného čísla a hodnotou výkonu a účinnosti kavitačného ohrievača. Z nameraných hodnôt je možné vypočítavať, že s klesajúcim kavitačným číslom exponenciálne stúpa hodnota výkonu ohrievača na približne 6500W, pri hodnote kavitačného čísla 0,11. Podľa článku [12] je však možné predpokladať, že priebeh zobrazený v grafe (Obr. 18) bude mať podobný tvar aj pre pracovné body, s vyšším pracovným tlakom v zariadení. Je dôležité uvedomiť si, že krivka nameraná pri prietoku Q_{V2} má hodnotu kavitačného čísla vyššiu, t.j. kavitácia v zariadení nie je tak výrazná, ako pri prietoku Q_{V1} . Zároveň však boli namerané vyššie hodnoty účinnosti v druhej fáze experimentu než v prvej fáze. Z tohto dôvodu je teoreticky možné zvýšiť účinnosť použitím pretlaku v zariadení, ktorý potláča vznik kavitačných bublín. Túto teóriu môžu v budúcnosti potvrdiť dôkladnejšie experimenty, ktoré by sa mali zamerať na určenie závislosti tejto charakteristiky zariadenia pre rôzne tlaky a sledovať, ako súvisí tlak pracovnej látky s účinnosťou.

Reynoldsove číslo, určujúce charakter prúdenia v zariadení, je hodnota určená obvodovou rýchlosťou rotora a vlastnosťami použitej pracovnej látky. Z rovnice (8) je zrejme, že týmito vlastnosťami sú hustota a viskozita kvapaliny. V budúcnosti by bolo užitočné otestovať vplyv kvapalín s rôznou viskozitou na tvar tejto charakteristiky. Dôvodom prečo má Reynoldsove číslo vplyv na množstvo generovaného tepla je podľa článku [12] hypotéza, že silne turbulentné prúdenie napomáha nukleácií kavít a zároveň sa teplo produkuje aj disipáciou energie tohto prúdenia.

Pod pojmom optimálny pracovný bod, rozumieme hodnoty vstupných parametrov kavitačného ohrievača, pri ktorých bude tento stroj pracovať s vysokými hodnotami účinnosti a s relatívne vysokým rozdielom teplôt medzi vstupom a výstupom. Pri hľadaní optimálneho pracovného bodu kavitačného ohrievača bude nutné vykonať detailnejšie experimenty popísané

v predchádzajúcich odstavcoch. Zo znalosti získaných meraním tohto stroja je možné odhadnúť, aké podmienky musí spĺňať optimálny pracovný bod. Dôležité je dosiahnutie nízkej hodnoty kavitačného čísla, ktoré by sa malo pohybovať v rozsahu 0,1 – 0,2. To je možné dosiahnuť vyššími otáčkami rotora, prípadne znížením tlaku pracovnej látky. Zaujímavosťou je, že v rôznych publikáciách [4, 7, 12] je tlak pracovného bodu s najvyššou účinnosťou približne tri až šesťkrát vyšší ako atmosférický. Príkladom môže byť kavitačný tepelný generátor popísaný v článku [12], ktorý prestáva pri tlaku na vstupe nižšom ako 1,25 bar pracovať a najvyššia účinnosť bola nameraná pri tlaku 3,01 bar. Dôvodom môže byť to, že pretlak v zariadení spôsobuje rýchlejšiu implóziu kavit, tým pádom aj ich kratšiu životnosť. Zároveň kratšia životnosť kavit spôsobuje ich vyšší počet za jednotku času. Podľa hypotézy opísanej v kapitole 2 má práve tento faktor zásadný vplyv na teplotu ohrievaného média. Z grafov (Obr. 20 a 21) zobrazujúcich závislosť medzi výkonom a Reynoldsovým číslom a účinnosťou a Reynoldsovým číslom vyplýva, že optimálny pracovný bod sa nachádza v oblasti s vysokou hodnotou Reynoldsovho čísla, pretože disipáciou energie silne turbulentného prúdenia je pracovná látka tiež ohrievaná. Posledným parametrom dôležitým pri určení pracovného bodu je objemový prietok zariadením. Vo všetkých vyššie popísaných charakteristikách je možné vidieť, že s rastúcim prietokom stúpa účinnosť ohrievača. Nevýhodou je dramatický pokles hodnoty Δt . Všetky popísané charakteristiky a ich vplyv na účinnosť kavitačného ohrievača je potrebné zohľadniť pri konštrukčnom návrhu kavitačných ohrievačov tohto typu.

Prítomnosť kavitácie počas prevádzky zariadenia bola nepriamo pozorovaná a potvrdená. Na Obr. 22 je zobrazená časť vnútornej steny bubna kavitačného ohrievača, na ktorom sú známky kavitačnej erózie. Na obrázku sú jasne viditeľné svetlejšie a tmavšie pruhy. Rozdielna odrazivosť povrchu je spôsobená narušením materiálu bubna v miestach s výskytom kavitácie. Erózia rotora nebola pozorovaná, a preto je možné predpokladať, že dielec najviac zaťažený kavitáciou je práve bubon ohrievača. Preto je potrebné vykonať experiment zaoberajúci sa mierou kavitačnej erózie a jej vplyvu na životnosť tejto súčiastky.



Obr. 22 Kavitačná erózia vnútornej steny bubna kavitačného ohrievača

Porovnanie výstupných parametrov bolo zamerané na účinnosť tohto stroja. Kavitačný ohrievač tohto typu sa porovnával s inými popísanými ohrievačmi a zároveň, z dôvodu určenia konkurencieschopnosti, aj s kotlami dostupnými na trhu. Všetky kotly v Tabuľke 1 sú určené pre vykurovanie domov a bytových jednotiek a s plne automatickou prevádzkou. Prvým opísaným kotlom je kotol VERNER A251 [14], určený na spaľovanie sypkej biomasy ako napríklad drevené pelety. Ďalším kotlom v tabuľke je stacionárny plynový kondenzačný kotol Lev 25 KKZ90 [15], určený na vykurovanie a prípravu teplej vody. Posledným sledovaným kotlom je elektrický kotol Raja 24K [16, 17] s maximálnym výkonom 24kW. Na kavitačnom ohrievači bola nameraná účinnosť, ktorá dosahuje hodnoty 95,14%. V porovnaní s ohrievačom RIA a kavitačným tepelným generátorom je táto účinnosť výrazne vyššia. Kavitačný ohrievač má účinnosť dokonca vyššiu ako moderný kotol VERNER A251. Účinnosťou bol kavitačný ohrievač prekonaný len kondenzačným plynovým kotlom a elektrickým kotlom, ktoré sú jedni z najefektívnejších vykurovacích zariadení na trhu.

Tabuľka 1 Porovnanie výkonu a účinnosti kavitačných tepelných generátorov a kotlov

	<i>Kavitačný ohrievač</i>	<i>RIA</i>	<i>Kavitačný tepelný generátor</i>	<i>VERNER A251</i>	<i>Lev 25 KKZ90</i>	<i>Raja 24K</i>
<i>Výkon [kW]</i>	6,7	7,3	55	25	25	24
<i>Účinnosť [%]</i>	95,14	63,6	94,43	91	98-97	99,5

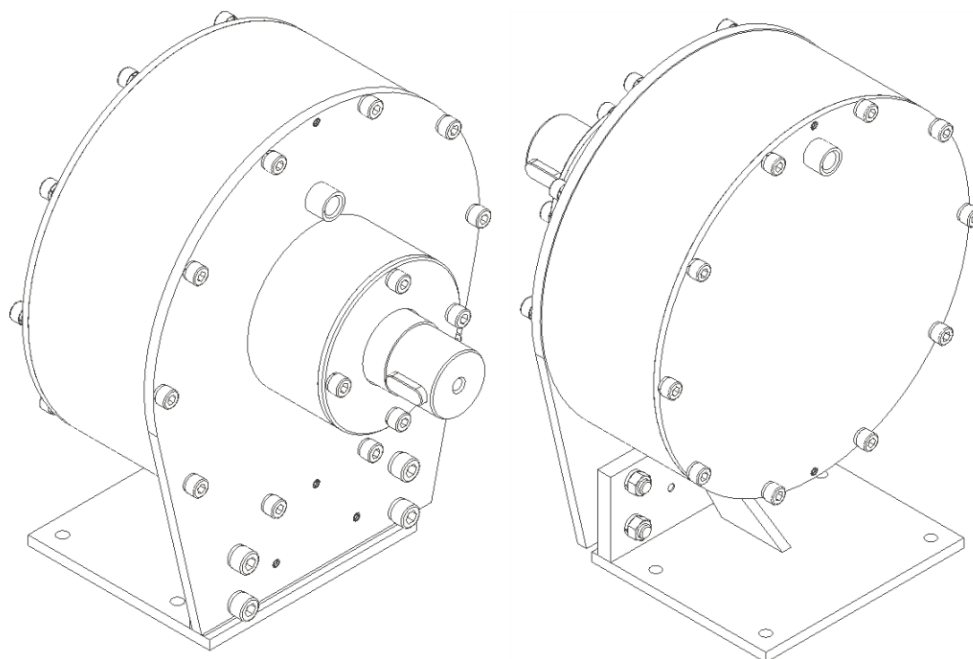
6.1. Konštrukčné úpravy kavitačného kotla

Problémy a konštrukčné nedostatky kavitačného ohrievača, použitého v experimente, vyrieši ďalší model kavitačného ohrievača. Použitý kavitačný ohrievač nie je schopný pracovať s tlakom v pracovnom priestore, ktorý je vyšší, alebo nižší, ako atmosférický tlak. Ohrievač je zároveň limitovaný nemožnosťou výmeny rotora. Z toho vyplýva, že určenie vplyvu geometrie rotora na generované teplo a účinnosť nie je, s použitým zariadením, možné.

Nový kavitačný ohrievač by mal tieto nedostatky vyriešiť a zároveň priniesť niektoré vylepšenia do konštrukcie. Kavitačný ohrievač zobrazený na Obr. 23 (Príloha 3), rieši problémy spojené s tlakom v pracovnom priestore použitím mechanickej upchávky, ktorá oddeľuje priestor ložiskovej skrine a pracovný priestor ohrievača. Použitím jedného tesniaceho elementu namiesto troch, sa znížia straty ohrievača spôsobené trením, čo bude mať pozitívny vplyv na celkovú účinnosť ohrievača.

Rotor ohrievača v budúcom stroji je na hriadeľi uložený letmo z dôvodu jednoduchšej výmeny rotora, za rotor s inou geometriou dier. Limitujúcim faktorom v experimente boli maximálne otáčky použitého elektromotora, tým pádom tak vznikol horný limit hodnoty obvodovej rýchlosti. Priemer rotora bude navýšený o 90 mm a tak bude možné prešetriť širší rozsah pracovných bodov ohrievača. Krútiaci moment sa bude na rotor prenášať pomocou dvoch tesných pier a bude axiálne poistený pomocou podložky a matice vlastnej konštrukcie.

Poslednou konštrukčnou úpravou ohrievača je prečerpávacia jednotka, ktorá by bola uložená na hriadeľi za rotorom. Ohrievač schopný pracovnú látku samostatne prečerpávať, by tak získal, oproti všetkým spomínaným ohrievačom a kotlom, výhodu. Odpadne tak nutnosť použitia čerpadla, ktoré sa vo vykurovacích systémoch nachádza. Regulovanie prietoku by tak bolo možné zmenou otáčok hriadeľa, alebo pomocou škrtiaceho ventilu, umiestneného za ohrievačom.



Obr. 23 Kavitačný ohrievač novej konštrukcie bez prečerpávacej jednotky

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zhrnúť informácie o kavitačných ohrievačoch, prezentovať a zhodnotiť výsledky merania exempláru kavitačného ohrievača vlastnej konštrukcie.

Prvá kapitola, ktorá spadá pod rešeršnú časť bakalárskej práce, popisuje kavitáciu, vznik a životný cyklus kavity od nukleácie až po implóziu. Vysvetľuje, že kavitácia vzniká v oblasti s tlakom v kvapaline nižším ako tlak nasýtených pár. Kolaps kavitačnej bubliny sa nazýva implózia, ktorá vyvoláva v kvapaline tlakové pulzácie a akustickú emisiu [2].

Ďalšia kapitola tejto práce sa zaoberá tepelnými účinkami kavitácie a zároveň opisuje teóriu, ktorá nebola do teraz experimentálne potvrdená a ktorá by mohla stáť za mechanizmom ohrevu pracovnej látky v kavitačných tepelných generátoroch. Kapitola opisuje niekoľko vybraných kavitačných tepelných generátorov, ich konštrukciu a merania niektorých zariadení.

Prvým z opísaných ohrievačov bolo zariadenie na ohrev tekutín patentované v roku 1993 [7]. Tento ohrievač bol jedným z prvých zariadení úspešne využívajúcich kavitáciu na ohrev vody. Následne bol prezentovaný ohrievač patentovaný v roku 2005, americkým vynálezcom Christianom Thomom. Zariadenie je konštrukčne podobné s predchádzajúcim zariadením, ale ako generátor kavít je použitý rotujúci perforovaný disk namiesto valca s vyvrtanými dierami na obode [8]. Podobne ako Thomov kavitačný ohrievač, tak aj kavitačný tepelný generátor [9, 12], popísaný v kapitole 2.5, používa rotor v tvare disku s navrtanými slepými dierami na čele rotora, v blízkosti vonkajšej hrany disku. Toto zariadenie malo v pracovnom bode, definovanom otáčkami 3550 min^{-1} a tlakom na vstupe 3,01 bar, nameranú účinnosť až 94,43 %, čo je pomerne veľa. Tento stroj tak dokáže konkurovať bežne používaným spaľovacím kotlom. Rotačné impulzné zariadenie [4], označované skratkou RIA, je zariadenie, ktorého generátor kavít sa skladá zo statorovej a rotorovej časti. Voda vstupuje do generátoru vnútornou stranou rotujúcej obruče, ktorá ma kolmo na os vyvrtané diery. Rotor dodáva kinetickú energiu kvapaline, ktorá je odstredivou silou vytláčaná dierami von. Voda sa tak dostáva do statorovej časti kavitačného generátora, tvoreného ďalšou obručou s dierami. Počas otáčania rotora sa tieto diery navzájom periodicky prekrývajú. V momente prekrytia dier a uzatvorenia priechodu je kvapalina v statorovej časti zotrvačnými silami nútená pokračovať v smere prúdenia, von z generátora kavít. Pri tomto pohybe tlak kvapaliny v statorových dierach klesne na hodnotu dostatočne nízku pre tvorbu kavitačných bublín. Ohrievač RIA je schopný 63,6% dodávanej energie premeniť na teplo.

Opisu konštrukcie kavitačného ohrievača, použitého v experimente, je venovaná tretia kapitola tejto práce. Materiál použitý na výrobu tohto stroja bola nerezová oceľ STN 17 248 so zmluvnou medzou kĺzu $R_{p0,2} = 220 \text{ MPa}$ [12]. Návrh konštrukcie bol inšpirovaný patentom [7]. Stroj využíva na generovanie kavít rotor, ktorý sa nachádza v pracovnom priestore a je uložený na hriadeľ medzi párom guľčkových ložísk. Geometria rotora a hriadele bola detailne opísaná a zároveň sa hriadeľ skontrolovala analyticky, s bezpečnosťou voči medznému stavu pružnosti $k = 1,5$. Výpočtom bolo zistené, že hriadeľ dokáže prenášať maximálny krútiaci moment $M_{kmax} = 13,8 \text{ Nm}$.

Štvrtá a piata kapitola bola venovaná návrhu a zhodnoteniu experimentu. Kavitačný ohrievač bol osadený snímačmi tlaku a teploty na vstupe a výstupe ohrievača. Prietok bol meraný pomocou prietokomeru a dynamometer meral krútiaci moment na hriadeli elektromotora poháňajúceho ohrievač. Pracovná látka bola prečerpávaná pomocou čerpadla.

Výsledky experimentu boli prezentované, ako závislosti výkonu a účinnosti od vstupných veličín ohrievača. Sledovali sa hodnoty príkonu, kavitačného a Reynoldsovo čísla. Prezentované závislosti medzi týmito veličinami boli zobrazené tak, aby rešpektovali obe fázy experimentu.

Diskusia je zameraná na vyhodnotenie nameraných charakteristík a opis experimentov, ktoré bude potrebné vykonať. V budúcich experimentoch sa bude klásť veľká pozornosť na závislosť vstupného tlaku a prietoku na účinnosť ohrievača. Prítomnosť kavitácie bola nepriamo potvrdená sledovaním povrchu bubna kavitačného ohrievača, na ktorom boli pozorované prvé známky kavitačného poškodenia. Preto je potrebné preskúmať mieru kavitačnej erózie a s tým spojenú životnosť zariadenia. Všetky diskutované výsledky merania slúžili ako základ pri návrhu nového kavitačného ohrievača, ktorý rieši limitácie meraného zariadenia.

Z informácií prezentovaných v tejto práci a z nameraných charakteristík ohrievača je zrejme, že problematike kavitačných tepelných generátorov, by mala byť v budúcnosti venovaná náležitá pozornosť. Kavitácia má v praxi široké využitie v rôznych aplikáciách, ako je napríklad homogenizácia potravín, dezinfekcia [18] alebo výroba bionafty [19]. Ohrievanie kvapalín je tak len jedným možným odvetvím, v ktorom je možné využívať kavitáciu, ako účinný nástroj.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] CHANG, Tae-Bong. HIGH EFFICIENCY HEATER USING SPATIAL ENERGY [online]. US 2010/0059600 A1. 2010. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20100059600A1/en?q=US+2010%2F0059600+A1>
- [2] BRENNEN, Christopher Earls. *Cavitation and Bubble Dynamics* [online]. B.m.: Oxford University Press, 1995. ISBN 9781107338760. Dostupné z: [doi:10.1017/CBO9781107338760](https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760)
- [3] *Cavitation and Erosion on Marine Propellers* [online]. Dostupné z: <https://form.jotformeu.com/51854771733361>
- [4] VED, Viktor, Valeriy NIKOLSKY, Olga OLIYNYK a Alexander LIPEEV. Examining a cavitation heat generator and the control method over the efficiency of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* [online]. 2017, **4**(8 (88)), 22–28. ISSN 1729-4061. Dostupné z: [doi:10.15587/1729-4061.2017.108580](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580)
- [5] KUBINA, D. Kavitujuce prudenie v perforovanom disku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojniho inžénrství, 2016. 80 s. Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
- [6] TOMITA, Yukio a Akira SHIMA. On the behavior of a spherical bubble and the impulse pressure in a viscous compressible liquid. *Bulletin of JSME* [online]. 1977, **20**(149), 1453–1460. Dostupné z: [doi:10.1299/jsme1958.20.1453](https://doi.org/10.1299/jsme1958.20.1453)
- [7] GRIGGS, Jim. APPARATUS FOR HEATING FLUIDS [online]. US 5,188,090 A. 1993. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5188090A/en?q=US+5%2C188%2C090>
- [8] THOMA, Christian Helmut. APPARATUS AND METHOD FOR HEATING FLUIDS [online]. US 6,976,486 B2. 2005. USA. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US6976486B2/en?q=US+6%2C976%2C486+B2>
- [9] KWON, Woo Chul a Joon Yong YOON. Experimental study of a cavitation heat generator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* [online]. 2013, **227**(1), 67–73. ISSN 0954-4089. Dostupné z: [doi:10.1177/0954408912451535](https://doi.org/10.1177/0954408912451535)
- [10] *Čo spôsobuje vodný kameň?* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.biohit.sk/clanky-novinky/co-sposobuje-vodny-kamen/>
- [11] *Rotary Impulse Apparatus* [online]. Dostupné z: <http://cwstech.at/products/ria/>
- [12] PYUN, Kwon Bum, Woo Chul KWON, Kyoung Taek OH a Joon Yong YOON. Investigation of the Performance for a Heat Generator Using Hydrodynamic Cavitation. In: *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference: Volume 1, Symposia – Parts A, B, C, and D* [online]. B.m.: ASME, 2011, s. 701–706. ISBN 978-0-7918-4440-3. Dostupné z: [doi:10.1115/AJK2011-22045](https://doi.org/10.1115/AJK2011-22045)
- [13] *Koróziivzdorná ocel' - antikora* [online]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/sk/koroziiivzdorna-ocel-antikora>
- [14] *Kotol VERNER A251* [online]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/sk/produkty/automaticke-kotly/verner-a251#tab3>

- [15] *Stacionárny plynový kondenzačný kotol Lev 25 KKZ90* [online]. Dostupné z: <https://www.protherm.sk/pre-nasich-zakaznikov/produkty/vsetky-produkty/stacionarny-plynovy-kondenzacny-kotol-lev-25-kkz90-517.html>
- [16] *Elektrický kotol Raja* [online]. Dostupné z: <https://www.protherm.sk/pre-nasich-zakaznikov/produkty/vsetky-produkty/elektricky-kotol-raja-833.html>
- [17] *Elektrokotly* [online]. Dostupné z: <http://www.profitelektro.sk/elektrokotly.pdf>
- [18] KIANIČKA, M. Využití kavitace v technické praxi. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [19] *The ShockWave Power Cavitation Reactor* [online]. Dostupné z: <https://www.hydrodynamics.com/>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

Značka	Jednotka	Význam
b	[mm]	Šírka tesného pera
CH ₂ O	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Merná tepelná kapacita vody
D	[m]	Priemer rotora
d ₁₋₄	[mm]	Priemery hriadele
d ₅	[mm]	Priemer diery na priemere d ₂
F	[N]	Sila
F _g	[N]	Tiažová sila
F _{max}	[N]	Maximálna sila pôsobiaca na tesné pero
g	[ms ⁻²]	Tiažové zrýchlenie
k	[-]	Bezpečnosť voči MSP
l	[mm]	Dĺžka tesného pera
l _h	[mm]	Vzdialenosť ložísk
M _k	[Nmm]	Krútiaci moment
M _{kmax}	[Nmm]	Maximálny krútiaci moment
m	[kg]	Hmotnosť rotora
n _{max}	[min ⁻¹]	Maximálne otáčky rotora
n	[min ⁻¹]	Otáčky rotora
P	[W]	Výkon elektromotora/ Príkon ohrievača
p	[Pa]	Tlak
p _v	[Pa]	Tlak nasýtených pár
p ₁	[Pa]	Tlak na vstupe kavitačného ohrievača
p ₂	[Pa]	Tlak na výstupe kavitačného ohrievača
p _D	[MPa]	Dovolený tlak pre staticky zaťažený ocelový náboj
Q	[W]	Výkon ohrievača
Q ₁	[W]	Výkon ohrievača pre prietok Q _{v1}
Q ₂	[W]	Výkon ohrievača pre prietok Q _{v2}
Q _m	[kg/s]	Hmotnostný prietok
Q _v	[m ³ /s]	Objemový prietok
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R _m	[MPa]	Medza pevnosti ocele
R _{p0,2}	[MPa]	Zmluvná medza kĺzu ocele
S	[mm ²]	Plocha
t	[°C]	Teplota
t ₁	[°C]	Teplota na vstupe kavitačného ohrievača
t ₂	[°C]	Teplota na výstupe kavitačného ohrievača
t ₁₁	[mm]	Hĺbka drážky pre tesné pero
v _o	[ms ⁻¹]	Obvodová rýchlosť na rotore
W _{k1}	[mm ³]	Kvadratický modul prierezu d ₁ v krute
W _{k2}	[mm ³]	Kvadratický modul prierezu d ₂ v krute
W _{o1}	[mm ³]	Kvadratický modul prierezu d ₁ v ohybe
α	[-]	Súčiniteľ koncentrácie napätia
μ	[Pas]	Dynamická viskozita
η	[-]	Účinnosť
ρ _{H₂O}	[kg/m ³]	Hustota vody

Značka	Jednotka	Význam
σ	[-]	Kavitačné číslo
σ_o	[MPa]	Napätie v ohybe na priemere d_1
σ_{ored}	[MPa]	Redukované napätie v ohybe na priemere d_1
τ_{k1}	[MPa]	Napätie v krute na priemere d_1
τ_{k2max}	[MPa]	Napätie v krute na priemere d_2

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Kavitácia na lodnej skrutke [3]	16
Obr. 2 Kavitačná erózia [2]	16
Obr. 3 Zariadenie na ohrev tekutín J. Griggs 1993 [7].....	18
Obr. 4 Zariadenie na ohrev tekutín C. Thoma 2005 [8]	19
Obr. 5 Vysoko účinný ohrievač využívajúci energiu vákua T. Chang 2010 [1].....	20
Obr. 6 Rotačné impulzné zariadenie [4].....	21
Obr. 7 Schéma zapojenia RIA v decentralizovanom tepelnom systéme. 1- elektromotor AIR-160S2, P=15kW, n=2930 min ⁻¹ ; 2-RIA; 3- tepelný výmenník; 4- zásobník r vody, objem-400 l; 5- čerpadlo YBC 25/6 [4]	21
Obr. 8 Kavitačný tepelný generátor [9].....	22
Obr. 9 Schéma zapojenia kavitačného tepelného generátora [12].....	23
Obr. 10 Vizualizácia prúdenia vysokorychlostnou kamerou dokazujúca prítomnosť kavitácie na disku, n = 3600 min ⁻¹ ; 14 000 fps [9].....	23
Obr. 11 Navrhnutý kavitačný ohrievač zobrazený v reze a v axonometrii	24
Obr. 12 Rotor kavitačného ohrievača zobrazený v reze a axonometrii.....	25
Obr. 13 Schéma zapojenia kavitačného ohrievača	28
Obr. 14 Kavitačný ohrievač zapojený podľa schémy.....	29
Obr. 15 Kavitačný ohrievač v zapojení spolu s elektromotorom	30
Obr. 16 Priebehy použitých aproximačných funkcií viskozity, hustoty a tlaku nasýtených pár (p_v) vody.....	32
Obr. 17 Graf závislosti príkonu ohrievača (P) od výkonu (Q)	33
Obr. 18 Graf závislosti výkonu a kavitačného čísla	34
Obr. 19 Graf závislosti účinnosti a kavitačného čísla	34
Obr. 20 Graf závislosti výkonu a Reynoldsovho čísla	35
Obr. 21 Graf závislosti účinnosti a Reynoldsovho čísla.....	35
Obr. 22 Kavitačná erózia vnútornej steny bubna kavitačného ohrievača.....	38
Obr. 23 Kavitačný ohrievač novej konštrukcie bez prečerpávacej jednotky	39

ZOZNAM PRÍLOH

- 1 Výkres zostavy Kavitačného ohrievača KK 1.00-1
- 2 Výsledky merania Kavitačného ohrievača KK 1.00-1
- 3 Výkres zostavy Kavitačného ohrievača KK 2.2N-1