

prof. Ing. Jiří BAŠTA, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav techniky prostředí

Matematická simulace termohydraulického rozdělovače

Mathematical Simulation of System Header

Recenzent
Dr. Ing. Petr Fischer

Článek se zabývá v souhrnné podobě problematikou termohydraulického rozdělovače (THR) využívaného jak v otopných soustavách, tak v chladicích systémech. Shrnuje stávající poznatky z hlediska návrhu a dimenzování a na základě výsledků z matematické simulace přináší nové poznatky a doporučení pro praxi.

Klíčová slova: termohydraulický rozdělovač, teplotní pole, proudové pole

The article deals with the issue of system header (SH) in summary form used both in heating systems and cooling systems. Summarizes current knowledge regarding the design and sizing based on the results of a mathematical simulation provides new insights and recommendations for practice.

Keywords: system header, temperature field, flow field

Termohydraulický rozdělovač (THR) není principiálně nic jiného než předimenzovaný zkrat kotlového okruhu, který má zanedbatelný hydraulický odpor. Na rozdíl od zkratu je v THR téměř nulový rozdíl tlaků mezi příívodem a zpátečkou. Aby THR plnil řádně svou funkci, musí být dodrženy určité podmínky jeho návrhu.

Správným termínem je termohydraulický rozdělovač. Bohužel se však objevují i termíny jako anuloid, výhybka, hydraulická spojka apod. Anuloid je definován jako rotační plocha vzniklá rotací kružnice kolem osy, která leží v její rovině a neprotíná ji. Anuloid je tedy geometrický útvar matematicky popsáný rovnicí kružnice rotující kolem osy x, y či z a nelze ho spojit se zařízením, plnicím v otopné soustavě určitou funkci. Termín výhybka vznikl nesprávným překladem z německého „die Weiche“. Ve slovníku skutečně najdeme překlad v podobě slov výhybka, bok, odbočení, slabina, s tím, že základ slova die Weiche je weich, což znamená měkký, měkce. V němčině je tedy slovo „Weiche“ plně adekvátní a vystihující funkci THR v soustavě, ale v českém jazyce směřuje významově zcela jinam. Jazykem, který použil v určité modifikaci termínu THR, byla francouzština, přičemž v termínu jsou obsaženy základní děje a vlastnosti zařízení.

Obecně se uvádí, že rychlost proudění otopné vody v THR musí být nízká a oběhové množství vody v kotlovém okruhu by mělo být větší než v okruhu sekundárním. Prof. Laboutka uvádí [1], že objemový průtok primárním (kotlovým) okruhem by měl být o 20 až 50 % vyšší než jmenovitý průtok sekundárním okruhem a zároveň rychlost proudění v THR vztahovaná k průtoku primárním okruhem by se pro jeho dimenzování měla uvažovat v rozmezí 0,1 až 0,25 m/s.

Takováto doporučení, byť s mnohdy odlišnými hodnotami průtoků a rychlostí, jsou uváděna i v jiné literatuře, avšak nikde není věrohodně zdůvodněno, proč právě tak veliký přebytek průtoku na primární straně. To nás vedlo k vytvoření modelu THR a zkoumání teplotních a proudových polí v THR na základě matematických simulací [2]. Zcela logická je volba malé rychlosti proudění vody v THR. Průměr THR navrhujeme z rovnice kontinuity, ve které vystupuje průtok primárním okruhem, průměr THR a rychlost proudění. S ohledem na potřebu minimální tlakové ztráty THR je třeba volit malou rychlost proudění.

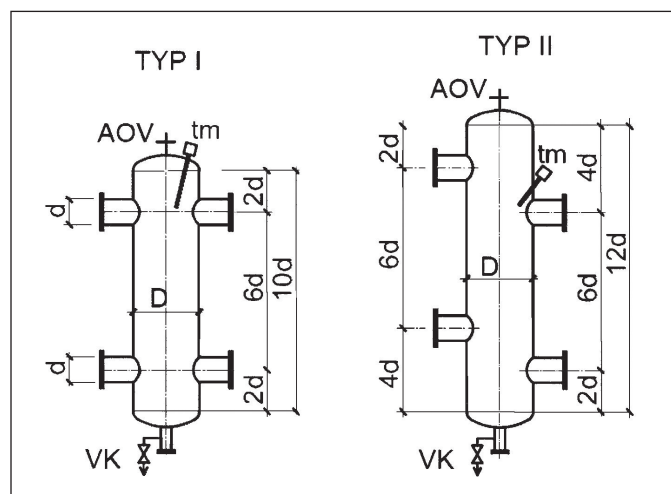
$$M_p = \frac{\pi D^2}{4} \rho w \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4V_p}{\pi w}}$$

kde je

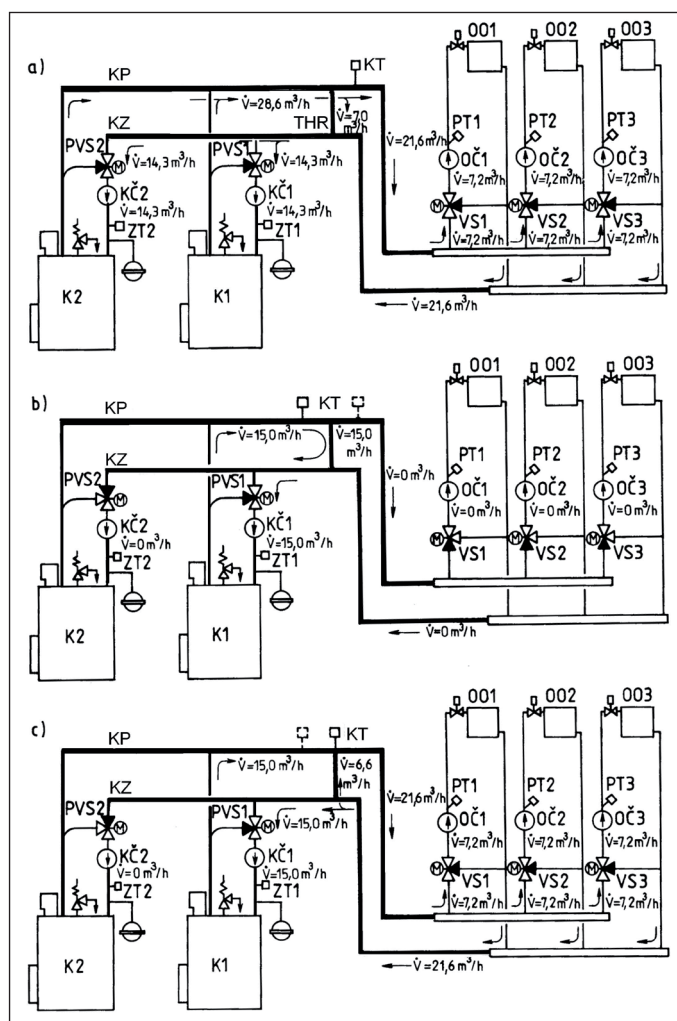
- M_p hmotnostní průtok primární stranou [kg/s],
- D vnitřní (event. hydraulický) průměr THR [m],
- ρ hustota teplotnosné látky podle střední teploty na primární straně [kg/m³],
- w rychlost proudění teplotnosné látky v THR = 0,1 až 0,25 m/s,
- V_p objemový průtok primární stranou [m³/s].

Termohydraulický rozdělovač vykazuje dvě základní konstrukční řešení, přičemž v praxi se používají ještě v dalších různých variantách. Konstrukce se liší uspořádáním vstupních a výstupních hrdel. Hrdla mohou být v jedné rovině nebo o daný rozměr posunuta. V prvním případě (typ I) se THR osazuje přepážkou různé podoby, aby nedocházelo k přímému proudění do soustavy z kotlového okruhu (je otázkou, zda je to dnes, v souvislosti s použitím u kondenzační techniky a tepelných čerpadel, rozumné, neboť to podporuje směšovací proudy v THR). THR je nutno projektovat vždy svisle [3].

Termohydraulický rozdělovač nachází uplatnění u soustav s více kotli nebo s více sekundárními okruhy, kde kompenzuje rozdíly mezi průtoky jednotlivých okruhů a tlakově „odděluje“ primární a sekundární stranu. Správně navržený THR tak zabraňuje vzájemnému tlakovému ovlivňování okruhu zdroje tepla a okruhu spotřebičů. Snížení rychlosti proudění teplotnosné látky v THR usnadňuje odvědušení otopné vody.



Obr. 1 Konstrukce THR [1]



Obr. 2 Různé provozní stavy s napojením kotlového okruhu na spotřebitelské přes THR [3]

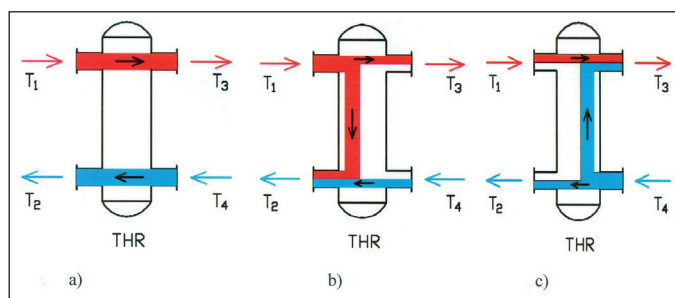
a) plný provoz; b) fáze přerušení odběru tepla; c) fáze vzrůstu potřeby tepla

Ve spodní části THR se mohou usazovat kaly, které se následně vypustí. Nevýhodou u THR je skutečnost, že se při většině provozních stavů zvyšuje teplota vody proudící zpět ke kotli (vysoká teplota zpátečky není žádoucí u kondenzačních kotlů a tepelných čerpadel).

Jak již bylo uvedeno, termohydraulický rozdělovač není principiálně nic jiného, než předdimenzovaný zkrat kotlového okruhu, proto jeho další chování postihne obr. 2, kde je THR zakreslen pouze jako zkrat v kotlovém okruhu. Na rozdíl od zkratu v kotlovém okruhu je ale v THR zanedbatelný rozdíl tlaků mezi přívodem a zpátečkou. Dosáhneme plného hydraulického propojení a vyloučíme protichůdné ovlivňování průtoků a tlaků primárního (kotlového) a sekundárního (spotřebitelského) okruhu.

Na obr. 2 jsou prezentovány tři fáze. Provoz obou kotlů je na obr. 2a. Přebytek průtoku kotlového okruhu nad sekundárními okruhy je přepouštěn přes THR do zpátečky kotle a umístění senzoru teploty na výstupu z THR je uspokojivé.

Při provozním stavu bez odběru tepla, tj. ve fázi přerušení odběru tepla (obr. 2b), vyvstává problém s údajem od senzoru teploty (KT). Ten se však dá jednoduše vyřešit předsunutím senzoru (KT) před THR. To však vede k tomu, že v případě většího průtoku sekundární stranou, tj. ve fázi vzrůstu potřeby tepla, dostáváme od senzoru (KT) nerepresentativní údaj (obr. 2c). Podle tohoto údaje by teplota přívodní vody do sekundárních okruhů byla stále nedostačující, neboť se v THR stále přepouští



Obr. 3 Schematické znázornění provozních stavů THR v systému vytápění a) při maximálním odběru spotřebitelskými okruhy a rovnosti průtoků na primární a sekundární straně; b) při poklesu odběru spotřebitelskými okruhy; c) při zvýšení odběru spotřebitelskými okruhy

chladná zpátečka do přívodní vody. Řešením je umístění čidla teploty vody z kotlového okruhu (KT) přímo do hlavy THR. Na tomto místě je senzor schopen uspokojivě postihnout každou fázi provozu. Umístění teplotního čidla (KT) v horní části THR vyhovuje všem provozním stavům vzhledem k řízení dodávky tepla do sekundárních okruhů.

SIMULACE PRO VYTÁPĚNÍ

Pro matematickou simulaci byly zvoleny tři idealizované provozní stavy. Indexy 1 a 2 jsou zvoleny pro označení teploty látky na kotlovém (primárním) okruhu a indexy 3 a 4 označují spotřebitelskou (sekundární) stranu.

V prvním případě se jedná o idealizovaný stav, kdy se teploty i průtoky teploty látky rovnají v obou okruzích. V tomto stavu se přívodní a vratná voda v THR směřuje jen zanedbatelně ve střední části. To je schematicky znázorněno na obrázku 3a, kde žádné směřování nevidíme. Tento případ v provozní praxi téměř nenastává.

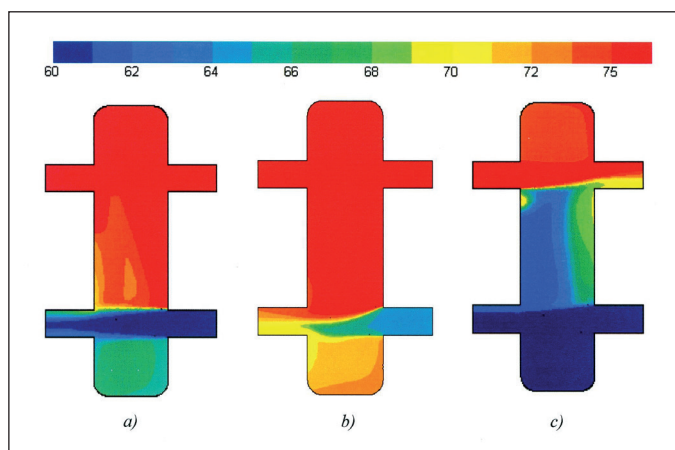
Ve druhém případě, na obrázku 3b, se jedná o provozní stav, kdy spotřebitelské okruhy odebírají méně tepla, z čehož vyplývá menší potřeba průtoku teploty látky. Žádaný hmotnostní průtok v kotlovém okruhu je větší než průtok ve vratném potrubí ze sekundárního okruhu. Proto bude z přívodu do THR voda proudit směrem k vratné vodě ze spotřebitelských okruhů. Požadovaný průtok kotli bude zachován.

V posledním případě je odebíráno spotřebitelským okruhem více vody, než je primárně do THR přiváděno kotlovým okruhem. Stav je schematicky znázorněn na obrázku 3c. Situace nastává při větším odběru tepla sekundární stranou, nebo při výpadku či opravě nějakého z kotlů. Za provozu se v THR přimíchává vratná voda do přívodního proudu pro sekundární stranu, čímž se soustava hydraulicky vyváží bez zanedbatelných tlakových výkyvů, ale teplota přiváděné vody do spotřebitelských okruhů bude nedostačující [3].

Prvním zkoumaným provozním stavem byl odběr tepla za jmenovitých podmínek, což představuje stoprocentní vytížení kotlů s maximálním odběrem spotřebitelských okruhů a návrhem bez nadprůtoku na primární straně. Druhým provozním stavem byla situace, kdy by došlo k výraznému poklesu odběru tepla na sekundární straně. A třetím byla situace, kdy je v provozu pouze jeden kotel, což představuje poloviční výkon kotlů, a na sekundární straně došlo ke zvýšení potřeby tepla na jmenovitou.

Teplotní pole

Obrázek 4, s teplotní stupnicí v °C, názorně porovnává rozložení teplot při třech provozních stavech. Dokumentuje průběh směřování a teplotní ovlivňování proudů, včetně hydraulického chování ve střední části těla

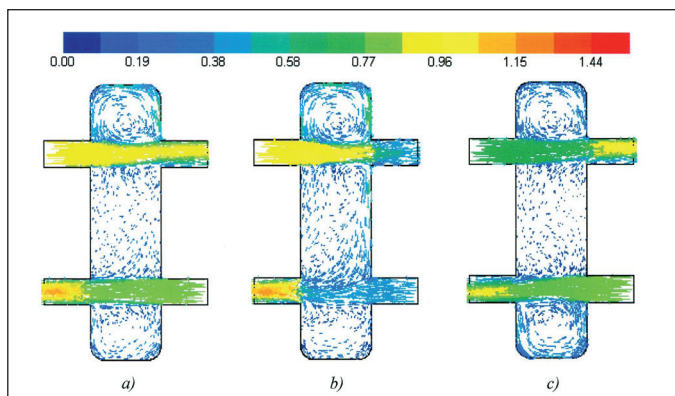


Obr. 4 Grafické porovnání simulace tří provozních stavů – teplotní pole [2]
a) provozní stav 1 – jmenovité podmínky; b) provozní stav 2 – náhlý pokles potřeby tepla spotřebitelskými okruhy; c) provozní stav 3 – náhlé zvýšení potřeby tepla spotřebitelskými okruhy

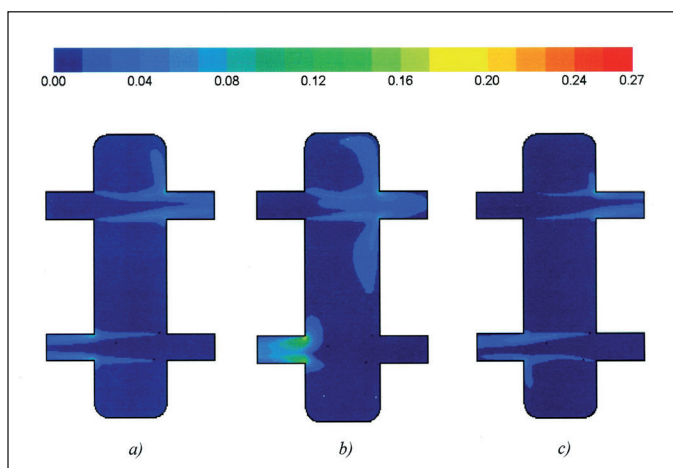
THR. Při jmenovitých podmínkách provozu a při stavu náhlého poklesu odběru spotřebitelskými okruhy nevzniká problém s požadavkem na požadovanou teplotu v přírodním hrdle do spotřebitelských okruhů i přes to, že v THR dochází k mírnému směšování proudů. Naopak v případě náhlého zvýšení odběru spotřebitelských okruhů, dochází ke snížení vstupní vody do spotřebitelských okruhů, a to má za následek podkročení požadované teploty pro spotřebitelské okruhy. Z uvedených poznatků je možné konstatovat, že se v THR zvyšuje teplota vratné vody ke kotlům i přes to, že byly projektovány stejné průtoky na primární i sekundární straně. Další oblastí zájmu byly teploty v hlavě THR. Tedy v místě, kam se umísťuje teplotní čidlo pro regulaci. V tomto místě se u prvních dvou variant teploty rovnají teplotě na přívodu do THR od zdrojů tepla. Poslední varianta se v tomto místě liší o pouhých 1,5 K a senzor umístěný v hlavě THR nedává reprezentativní údaj.

Proudové pole

Obrázek 5, s barevnou stupnicí rychlostí v m/s, porovnává rozložení vektorů rychlostí opět pro tři provozní stavy. Na průběhu směru proudů (vektorů) v okolí hrdel je vidět, kdy se proudy v THR směšují. Proud u přírodního hrdla do spotřebitelského okruhu se zvedá a dosahuje největší rychlosti v místě kontrakce proudů. Ke kontrakci přiváděného teplého proudu vody dochází s ohledem na víření a směšování proudů v THR. U provozního stavu jedna a dvě je patná významná kontrakce v hrdle pro vratnou vodu zpět ke kotlům. U poslední situace je největší rychlost u přírodního hrdla ke spotřebitelským okruhům.



Obr. 5 Grafické porovnání simulace tří provozních stavů – vektorové rychlostní pole; a) provozní stav 1 – jmenovité podmínky; b) provozní stav 2 – náhlý pokles potřeby tepla spotřebitelskými okruhy; c) provozní stav 3 – náhlé zvýšení potřeby tepla spotřebitelskými okruhy [2]



Obr. 6 Grafické porovnání simulace tří provozních stavů – kinetická energie turbulence [2]
a) provozní stav 1 – jmenovité podmínky; b) provozní stav 2 – náhlý pokles potřeby tepla spotřebitelskými okruhy; c) provozní stav 3 – náhlé zvýšení potřeby tepla spotřebitelskými okruhy

Zajímavým poznatkem je průběh rychlostí v hlavě THR, ve které se vyskytují větší rychlosti poblíž stěn. Ve spodní části, kde se usazuje kal, jsou rychlosti proudění zanedbatelné, až na poslední provozní stav, kdy dochází k nárůstu rychlostí a víření usazenin. Lze tedy konstatovat, že kal bude u prvních dvou provozních stavů bez větších problémů usazen na dně THR.

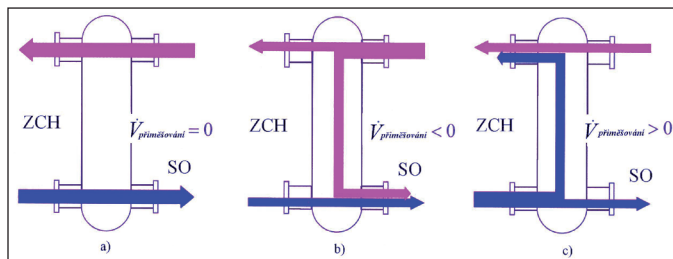
Kinetická energie turbulence

Obrázek 6, se stupnicí v jednotkách m^2/s^2 , porovnává zvýšení kinetické energie turbulence u zkoumaných provozních stavů. Z výše uvedených poznatků je patrné, že největší velikosti kinetické energie turbulence jsou poblíž stěn u přechodu z těla do hrdel odvádějících teplotnosnou látku z THR. Zajímavým zjištěním bylo zvýšení hodnoty kinetické energie turbulence v jedné čtvrtině hlavy THR blíže k napojení spotřebitelských okruhů především u dvou prvních případů.

SIMULACE PRO CHLAZENÍ

Kolegové z Německa se zabývali problematikou THR ve vztahu k systému dálkového chlazení, kde využili jak měření na díle, tak následně matematické simulace. Posouzení se omezovalo na systém s chladicí vodou se třemi teoretickými provozními stavy [4]. Stejně jako v našem případě se němečtí kolegové zaměřili na tři základní provozní stavy (obr. 7).

- a) První stav byl definován tak, že průtok primární stranou se zdrojem chladu byl stejný jako průtok sekundární spotřebitelskou stranou (obr. 7a).

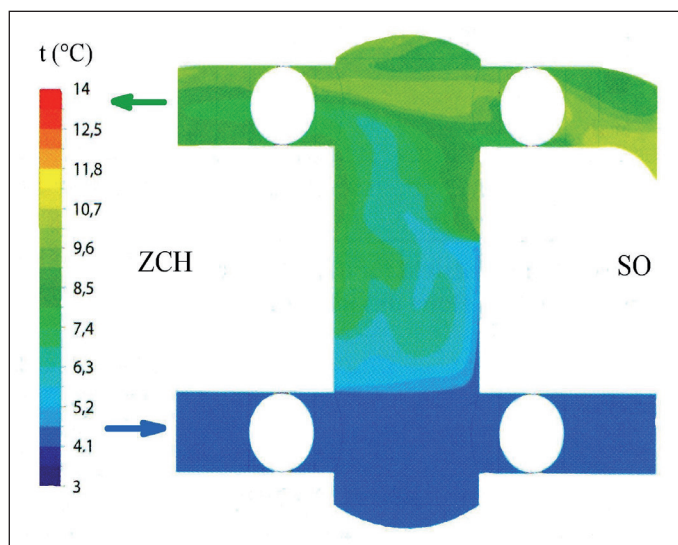


Obr. 7 Schematické znázornění provozních stavů THR v systému chlazení
a) při maximálním odběru chladu spotřebitelskými okruhy a rovnosti průtoků na primární a sekundární straně; b) při zvýšení odběru spotřebitelskými okruhy; c) při poklesu odběru spotřebitelskými okruhy; ZCH – strana zdroje chladu; SO – strana spotřebitelských okruhů

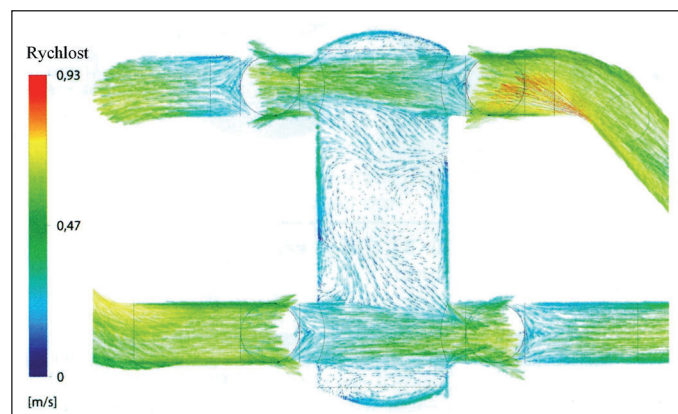
- b) Druhý stav schematicky naznačuje případ, kdy je objemový průtok sekundární spotřebitelskou stranou větší než objemový průtok stranou primární se zdrojem chladu.
- c) Třetí stav na obr. 7c ukazuje případ, kdy je objemový průtok sekundární spotřebitelskou stranou menší než objemový průtok stranou primární se zdrojem chladu a přiváděná chladicí voda se směřuje s ohřátou vratnou. Teplota vratné chladicí vody roste a dochází k poklesu teplotního poměru, jako ukazatele využití chladicího výkonu. U chladicích systémů s THR je to však běžný provozní případ.

Obr. 8 ukazuje vznik chladné zóny ve spodní části, resp. teplejší zóny v horní části THR při malém objemovém průtoku spotřebitelskými okruhy a vyšším průtoku na straně zdroje chladu. Na spodní části THR vzniká poměrně stabilní oblast chladné vody a zároveň dochází ke směřování chladné vody (vzestupný tmavě- a světlemodrý proud) s vratnou. V obrázku lze identifikovat vychýlení teplotního pole proti směru chodu hodinových ručiček nad chladnou zónou. Zpátečka ze spotřebitelských okruhů se směřuje s fluktuujícím chladným prouděním v THR a dosahuje nižší teploty.

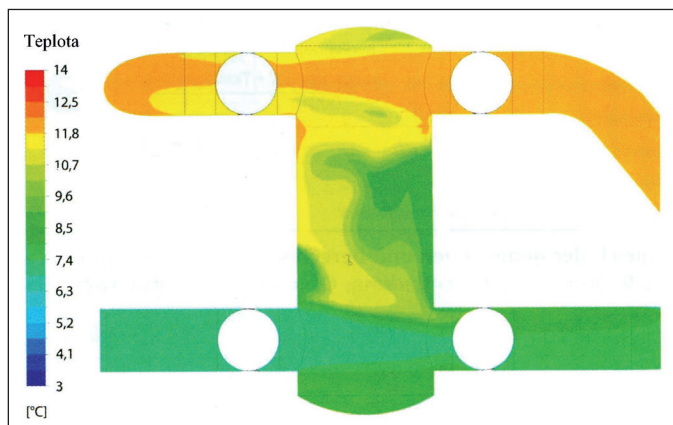
Ve všech případech dochází k horizontálnímu šíření proudění a tvorbě proudů v blízkosti stěn THR. Matematická simulace ukazuje, že v THR dochází k více či méně mohutným „stěnovým“ proudům. Tento jev je patrný na obr. 9 a 10 i v oblasti napojení přívodu a zpátečky. Vstupující proud do THR neproudí, s ohledem na různé interakce proudů, přímo k protilehlému hrdlu. Součástí interakce proudů je i různá míra směřování vody v THR. Simulace ukazují, že zde vznikají významné rozdíly



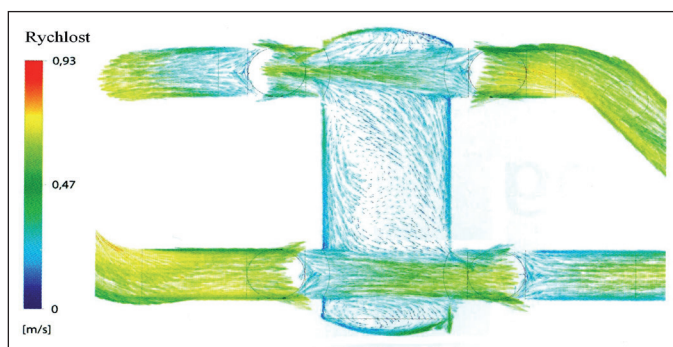
Obr. 8 Teplotní pole THR pro chlazení ve vertikálním řezu při mírném nadprůtoku na straně zdroje chladu [4]



Obr. 9 Rychlostní pole v osovém vertikálním řezu THR pro chlazení [4]



Obr. 10 Teplotní pole v osovém vertikálním řezu THR pro chlazení [4]



Obr. 11 Rychlostní pole v osovém vertikálním řezu THR pro chlazení pro případ napojení na akumulaci nádobu a fázi nabíjení [4]

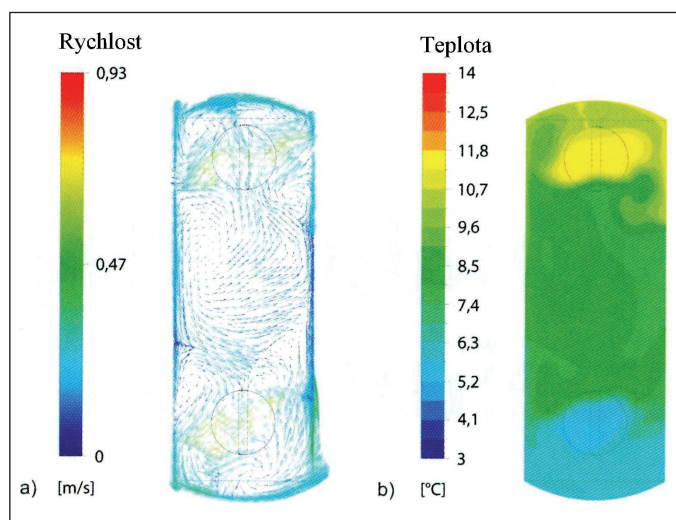
oproti schematicky naznačenému proudění v obr. 7. Jevy interakce a směřování proudů mohou nastat současně jak v horní, tak dolní části THR. Významně se však projevují u simulace zadané podle schématu na obr. 7b v dolní části THR a v simulaci zadané podle schématu na obr. 7c v horní části THR. Proudění na obr. 9 je částečně ovlivněno zahnutým připojovacím potrubím (oblouk), tj. nevstupuje ideálně v přímém směru do THR a vstupní proud je částečně zatížen rotací. Proto by, pokud to lze s ohledem na prostorové možnosti, mělo být před THR přímé ustalovací potrubí min. v délce deseti průměrů připojovacího potrubí.

Vznik nestabilních vírů a působení částečně asymetrického rozdělení vektorů rychlosti včetně působení „stěnových“ proudů zapříčiní v mnoha případech rotující proudění v THR, které má významně trojrozměrný charakter (obr. 11, 12). Rovněž zde můžeme pozorovat jakýsi neustálený „kývavý“ pohyb tekutiny.

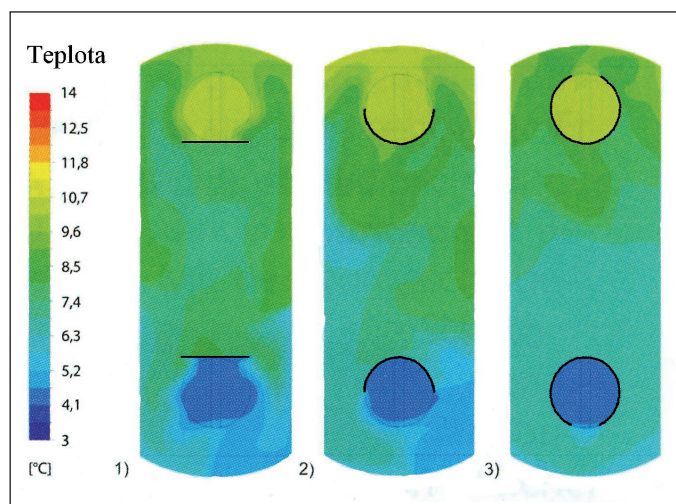
Vzhledem k výše uvedenému se další vývoj ubíral směrem omezení směřování, „stěnových“ proudů a vzniku nestabilních vírů v THR. Nabízela se cesta, jak minimalizovat směřování v THR, aniž by se měnily projektované rozměry THR, přes vestavby či zábrany v rozdělovači. Autoři [5] simulovali tři varianty.

První představovala využití horizontálně instalovaného rovného plechu o šířce rovné průměru přípojných potrubí (obr. 13). Plechy byly umístěny tak, aby oddělily proudění vody ve střední části THR a procházely tak jeho celou šířkou.

Druhá varianta představovala poloviční trubku, tj. trubku z poloviny uříznutou podél její osy, a instalovanou tak, aby propojovala protilehlé potrubí. Na rozdíl od první varianty autoři sledovali rovněž deformaci proudění vytékajícího a vtékajícího do THR.



Obr. 12 Rychlostní pole v osovém vertikálním řezu THR pro chlazení pro případ napojení na akumulční nádobu a fázi vybíjení [5]



Obr. 13 Teplotní pole v THR pro chlazení při použití 1) horizontálního plechu, 2) poloviční trubky a 3) štěrbinové trubky [5]

Třetí varianta byla pojata jako štěrbinová trubka. Jednalo se vlastně o variantu poloviční trubky s tím, že byla vyříznuta v menším úhlu tak, aby plocha (průřez) vyříznuté části odpovídala průřezu trubky.

Je patrné, že se vestavbami do THR posiluje vytváření chladné či teplé zóny, což se nejvíce projevilo při použití zábrany z polovičních trubek. Zejména při použití poloviční a štěrbinové trubky (obr. 13 – 2 a 13 – 3) se teploty vstupních proudů stabilizovaly, a to v závislosti na narůstající ploše trubky. Rozdíly u ověřovaných variant s poloviční a štěrbinovou trubkou byly nepatrné. Jednoznačně však lze potvrdit lepší dosažené výsledky u variant trubek oproti horizontálnímu rovnému plechu. Pokud je však již v přípojovací trubce na vstupu do THR výrazně nerovnoměrný proudový profil a tudíž i teploty, nelze dosáhnout potlačení výrazného směšování v THR ani při využití zábrany.

ZÁVĚR

Vytápění

Poznatky z matematické simulace THR pro vytápění nám umožňují učinit určité závěry, a to především stran reprezentativnosti umístění teplotního čidla a stran návrhu vlastního THR.

- ❑ Na základě poznatků o teplotních polích, rychlostních polích a kinetické energii turbulence lze konstatovat doporučení pro umístění teplotního čidla, které se standardně umísťuje ve středu hlavy THR. Z vyhodnocených výsledků simulace by bylo nejvhodnější umístit teplotní čidlo v hlavě THR do jedné čtvrtiny průměru blíže ke spotřebitelským okruhům, a to z důvodů větších rychlostí a zvýšení kinetické energie turbulence v doporučeném místě pro teplotní čidlo v hlavě THR. Tím bude zvýšena dynamika snímané teploty.
- ❑ Proudění v THR jednoznačně ukazuje, že nelze vycházet pouze ze směšovacích rovnic a že proudový děj je podstatně složitější. Na základě získaných výsledků tedy nelze doporučit předimenzovat průtok na primární straně o 20 až 50 % [1], ale je zcela patrné, že lze projektovat průtok na primární straně a sekundární v poměru 1:1, aniž by se změnila funkce THR nebo jeho provozní chování, a to především u systémů, kde je tepelné čerpadlo či kondenzační kotel. Nadále zůstává platné doporučení stran malých návrhových rychlostí proudění vody v THR (0,1 až 0,25 m/s).
- ❑ Je rovněž nasnadě zvážit využití vestaveb do THR v podobě poloviční či štěrbinové trubky, jež se osvědčilo u THR pro chlazení, a snažit se tak nezvyšovat teplotu zpátečky proudící do kondenzačního kotle.

Chlazení

U THR se jedná o proudové jevy, které závisí především na konstrukci THR, na rychlostních profilech vstupujících proudů a na efektivním směšování proudů uvnitř THR.

Důležitým poznatkem je, že při napojení THR na akumulční nádobu chladu se vyskytuje nestabilní chování proudění v THR i za jinak stabilních podmínek okolní soustavy. To znamená, že THR v takovémto napojení bude způsobovat teplotní výkyvy v napojené soustavě. Němečtí kolegové [4] provedli rovněž simulace za dynamicky se měnících okrajových podmínek. Závěry jsou shodné s výše uvedenými. Reálně dochází k tepelným ziskům (ohřívání) na chladicí vodě do spotřebitelské sítě a na zpátečce k chladicímu zařízení. Takovéto projevy ovlivňují chování jak okruhu zdroje chladu, tak spotřebitelských okruhů. S ohledem na projevy směšování proudů v THR klesá energetická účinnost zásobování chladem.

Vzhledem k výše uvedenému se další vývoj ubíral směrem využití vestaveb do THR. Identifikované nežádoucí jevy lze účinně potlačovat především polovičními a štěrbinovými trubkami instalovanými v THR tak, aby propojovaly protilehlé přípojně potrubí THR.

Kontakt na autora: jiri.basta@fs.cvut.cz

Literatura

- [1] LABOUTKA, K., MAREŠ, J. Problematika termohydraulického rozdělovače. *Vytápění, větrání, instalace*. 1999, roč. 8, č. 2, s. 66-72. ISSN 1210-1389.
- [2] JACURA, O. *Hydraulické chování THR*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. 9-TŽP-2013.
- [3] BAŠTA, J. *Hydraulika a řízení otopných soustav*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02808-9.
- [4] URBANEK, T., PLATZER, B. a kol. *Untersuchung einer hydraulischen Weiche in einem Fernkältesystem*. HLH. Bd. 65 / 2014 Nr. 7/8. Springer VDI Verlag
- [5] SANDER-SAILER, K. a kol. *Strömungstechnische Optimierung von hydraulischen Weiche*. HLH. Bd. 65 / 2014 Nr. 9. Springer VDI Verlag. ■