

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



**Čištění otopných soustav a jeho vliv na účinnost
systému**

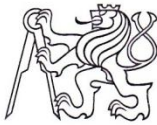
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Michal Třeška

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miroslav Urban, Ph.D.

2016/2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Třeška</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>460251</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra technických zařízení budov</u>		
Studijní program: <u>(N3649) Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor: <u>(3608T006) Budovy a prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Čištění otopných soustav a jeho vliv na účinnost systému

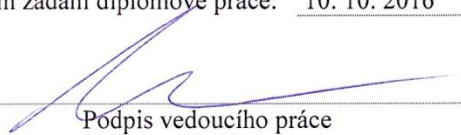
Název diplomové práce anglicky: Cleaning of heating system and its effect on the system efficiency

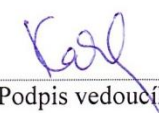
Pokyny pro vypracování:
Cílem diplomové práce je analyzovat problematiku čištění otopných soustav a jejich prvků. Práce se bude skládat z části teoretické řešerše daného problému a experimentálního měření.
Experimetální měření bude zaměřeno na výměníku v plynovém kondenzačním kotli na měřící trati.

Seznam doporučené literatury:
VDI 2035-1, VDI 2035-2
ČSN 07 7401
Technická příručka pro pracovníky oboru úprava vody, 1981
Úprava vody pro otopné systémy, 2002

Jméno vedoucího diplomové práce: Miroslav Urban

Datum zadání diplomové práce: 10. 10. 2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2016


 Podpis vedoucího práce

 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

10.10.2016



Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mielal Misha', is written above a horizontal dotted line.

V Praze 8. 1. 2017

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za odborné vedení mé diplomové práce panu Ing. Miroslavu Urbanovi, Ph.D. Dále bych rád poděkoval za poskytnuté materiály, podporu, spolupráci a odborné konzultace pracovníkům firem AV EQUEN s.r.o., Vaillant Group Czech s.r.o. a Unitherm K.V. s.r.o. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Abstrakt

Problematika účinnosti a provozní spolehlivosti teplovodních otopných soustav nabývá na významu v souvislosti se stále sofistikovanějšími tepelnými zdroji a snahou o snižování energetické náročnosti budov. Tato diplomová práce se zabývá vlivem úsad na funkci teplovodních otopných soustav ústředního vytápění. Práce postupně popisuje tematiku od příčin a ovlivňujících faktorů vzniku úsad, negativních projevů existence až po možnosti jejich odstraňování. Součástí práce je experiment měření vlivu inkrustace na účinnost plynového kondenzačního kolte. Výsledky práce potvrzují, že úsady snižují účinnost, provozní spolehlivost, životnost a komfort užívání systémů. Zabývat se tedy prevencí tvorby inkrustu a kvalitou topné vody je jistě žádoucí. V praxi je často potřeba čištění otopných soustav vyvolána až problematickým provozem, nedotápěním některých otopných těles, neprůchodností okruhů podlahového vytápění, cyklováním zdrojů, korozním napadením systému nebo zvukovými projevy proudění. Zároveň ale, zvláště u zdrojů využívajících latentního tepla spalin může čištění otopných soustav vést i k významným energetickým úsporám. Posouzení vhodnosti čištění a jeho možných přínosů je individuální záležitostí silně závislou na množství úsad, typu systému a zdroje včetně způsobu regulace.

Klíčová slova

Čištění otopných soustav, úsady v systémech vytápění, úprava topné vody, vliv inkrustace výměníku na účinnost zdroje.

Abstract

The issue of efficiency and operational reliability of heating systems is gaining importance in the context of the increasingly sophisticated heat sources and efforts to reduce the energy performance of buildings. This master's thesis deals with the impact of fouling on the function of hot water central heating systems. It describes gradually the theme from the causes and influencing factors on the formation of unwanted sediments, negative symptoms of existing fouling to the possibility of their removal. A part of this projekt is an experiment aimed at measuring the impact of encrustation on the efficiency of a gas condensing boiler. The results confirm that the fouling reduces efficiency, operational reliability, durability and user comfort. Therefore to deal with the prevention of incrustation and heating water quality is certainly needed. In practice it's common, that the need for cleaning of the heating system is triggered by the problem during operation of the equipment, insufficient heating of some radiators, underfloor heating circuits obstruction, cycling of heat sources, the emergence and expansion of corrosion in the heating system or sound speeches during flow. At the same time, especially in sources using the latent heat from the flue gas, cleaning of heating systems can also lead to significant energy savings. Assessment of the suitability of cleaning and its potential benefits is an individual matter which strongly depends on the amount of fouling, type of system and source type, including a control method.

Key Words

Cleaning of heating systems, fouling in heating systems, heating water treatment, influence of incrustation in heat exchanger on the source efficiency.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	3
3	Teoreticko-metodologická část	4
3.1	Literární rešerše a úvod do problému.....	4
3.2	Příčiny znečištění teplovodních otopných soustav	6
3.2.1	Tvrdost (obsah vápníku a hořčíku)	7
3.2.2	pH.....	10
3.2.3	Alkalita.....	11
3.2.4	Solnost – iontově rozpuštěné látky, konduktivita.....	11
3.2.5	Mikrobiální aktivita – vliv bakterií a řas	13
3.2.6	Kotelní kámen – vliv hydrogenuhličitánových a vápenných iontů	13
3.2.7	Koroze – vliv O ₂ , H ₂ , CO ₂	16
3.3	Fyzikální faktory ovlivňující riziko koroze a tvorby úsad	21
3.3.1	Hustota tepelného toku	22
3.3.2	Drsnost povrchu teplosměnných ploch.....	22
3.3.3	Rychlost proudění	24
3.4	Legislativní požadavky ve vztahu k problematice.....	25
3.5	Výpočet účinnosti zdrojů tepla.....	29
3.6	Výzkumný problém.....	32
3.7	Metodika práce.....	32
4	Aplikační část a experimentální část	34
4.1	Experiment, stanovení potenciálu zvýšení účinnosti zdroje	34
4.1.1	Popis zdroje a systému.....	34
4.1.2	Metodika a postup zkoušení	36
4.2	Důsledky znečištění teplovodních soustav.....	40

4.3	Opatření pro ochranu soustavy.....	54
4.3.1	Fáze přípravy a tvorby projektové dokumentace.....	55
4.3.2	Fáze realizace a uvedení do provozu	57
4.3.3	Fáze provozní.....	58
4.4	Základní možnosti úpravy vody v topných systémech	58
4.4.1	Úprava tvrdosti vody	58
4.4.2	Úprava obsahu kyslíku v soustavě.....	60
4.5	Možnosti čištění otopných soustav	62
4.6	Postup chemického čištění soustavy v praxi.....	63
5	Diskuze výsledků.....	68
5.1	Návrhy opatření.....	69
6	Závěr.....	71
	Seznam zdrojů.....	73
	Seznam tabulek	78
	Seznam obrázků.....	79
	Přílohy.....	81

1 Úvod

Tato diplomová práce se bude zabývat zanášením teplovodních otopných soustav, jejich čištěním a vztahu k účinnosti především v segmentu budov s ústředním zdrojem tepla. Téma jsem vybíral na základě úvahy o možnostech řešení praktického problému, se kterým se pracovníci v oboru vytápění mohou při výstavbě, rekonstrukcích a provozování otopných soustav setkat. V diplomové práci budou zdůvodněny příčiny výskytu, možnosti odstranění a předcházení tvorby usazenin v teplovodních otopných soustavách. V úvodních kapitolách bude práce přehledem současného stavu poznání o této problematice vztaženém na oblast teplovodních otopných soustav budov s ústředním zdrojem tepla. V dalších částech se předmětem kapitol stane experiment s cílem vyjádřit vliv usazenin a stanovit potenciał přínosů čištění otopných soustav s ohledem na zvýšení účinnosti zdroje. Čištění otopných soustav může mít také pozitivní vliv na jiné parametry jako uživatelský komfort (přetápění, nedotápění otopných těles, zvukové projevy) nebo životnost jednotlivých prvků. Tyto přínosy lze ovšem velmi obtížně exaktně vyjádřit, z tohoto důvodu bude v práci kladen důraz především na přínosy energetické.

Zatímco ve velké energetice, kterou zastupují kotelny, výtopny, teplárny, elektrárny, obecně tedy zdroje velkých výkonů, je čistota chladících, teplovodních, horkovodních a parních okruhů velmi exponovanou záležitostí včetně normové opory, u teplovodních soustav do 60 kW ale není této problematice věnována přílišná pozornost. Důvod je nasnadě. Problematika čistoty otopných soustav je poměrně složitá, zahrnuje řadu termochemických, elektrochemických a termomechanických jevů. Právě s ohledem na náročnost a nákladově optimální řešení nebyla v minulosti tomuto oboru v případě menších soustav věnována taková pozornost. Dnes je ale situace v mnoha ohledech jiná a vybízí k zamyšlení, zda tento přístup není na čase přehodnotit. Z důvodu zlepšování tepelně technických vlastností dnešních budov je možná instalace zdrojů o násobně nižších výkonech i do relativně rozsáhlých systémů s velkou investiční náročností. Koncepce dnes navrhovaných soustav, jejich materiálové báze, montážní technologie, použité prvky a teplotní spády se od soustav používaných v nedávné minulosti podstatně liší, což nesporně přináší řadu výhod, ale také řadu problémů, se kterými jsme se dříve nesetkávali. Jako příklad lze uvést zavzdušňování a následnou korozi v soustavě s difuzí kyslíku přes stěny plastových potrubí bez kyslíkové bariéry nebo tvorbu slizových útvarů (tzv. zooglea) působením mikroorganismů, se kterými se dnes díky použitým materiálům a nízkým teplotním spádům setkáváme stále častěji. Tyto a mnohé další nové problémy před nás staví vývoj. V souvislosti se

snahou o energetickou efektivitu a úspory vstupují do popředí zájmu také stále více sofistikované zdroje a prvky soustavy. S ohledem na tuto skutečnost vzrůstají nároky na provozní podmínky těchto zařízení i v oblastech menších výkonů kde se historicky tato problematika tolik neřešila. Tento trend je možné pozorovat na vzrůstajících požadavcích na kvalitu napouštěcí a oběhové vody ze strany výrobců tepelných zdrojů. Otopné soustavy jsou obecně složeny ze zdroje tepla, distribuční soustavy a otopných ploch. Tyto prvky jsou kromě mechanického spojení propojeny také teplonosnou kapalinou. Ve většině aplikací v oblasti teplovodních soustav to je voda. Vodu zde ovšem nelze vnímat jako chemicky čistou kapalinu, ale jako roztok, který reaguje se stěnami nádoby, v tomto případě vnitřními plochami otopné soustavy. Právě složení tohoto roztoku a jeho reakce s vnitřními povrchy jsou základním činitelem při tvorbě usazenin a kalů v otopné soustavě, které následně ovlivňují její provoz. Kvalita napouštěcí respektive oběhové vody je pro tvorbu usazenin a kalů zcela zásadní. Jak už bylo řešeno, voda, ani pitná voda z vodovodního řádu není chemicky čistá. Vždy v sobě obsahuje řadu rozpuštěných a někdy i nerozpuštěných látek, které ovlivňují vznik usazenin a kalů v soustavě. Dalšími faktory, které mají na tvorbu usazenin a kalů vliv, jsou zejména materiálové složení soustavy, import kyslíku, teplotní spády, rychlosti proudění a měrné výkony výměníků tepelných zdrojů.

Motivaci pro čištění otopných soustav z pohledu majitele otopné soustavy, potažmo objektu, lze dnes spatřovat především v tom, že některá z otopných těles nemají požadovaný výkon nebo díky zmenšeným průřezům uvnitř regulačních ventilů dochází ke zvýšení rychlosti proudění a s tím spojeným zvukovým projevům. Z technického i ekonomického hlediska lze ale spatřovat motivaci i v dalších aspektech, jako jsou zvýšené náklady na provoz otopné soustavy způsobené: přetápěním, snížením účinnosti výměníků tepla a otopných ploch, vyšší spotřebou elektrické energie oběhových čerpadel a snížením životnosti jednotlivých prvků soustavy. O vlivu usazenin na výše zmíněné provozní náklady se všeobecně ví, ale o tom, jak velké energetické, respektive ekonomické ztráty mohou představovat, je velmi obtížné hovořit. Z globálního pohledu například Kazi (2012) spočítal, že ekonomické ztráty vlivem zanesených výměníků představují 0,2 % světového HDP. Palčivost problému je zřejmá i z dřívější historie. Už v roce 1938 v knize Kotelní kámen Štiegler (1938) spočítal, že ztráty Československých drah způsobené nánosy na stěnách kotlů parních lokomotiv tvoří 10–20 % nákladů vynaložených na palivo a mazivo. Existují sice zdroje a výpočty, které hovoří o tom, o kolik se zhorší přenos přestupem tepla, pokud bude na vodní straně výměníku usazenina o definované tloušťce. Ve skutečné otopné soustavě ale dochází k problému přesahujícím model tohoto zjednodušeného schématu. Z tohoto důvodu provedu experiment, kterým se na příkladu konkrétní otopné soustavy budu snažit skutečnému provoznímu stavu přiblížit více.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je vytvoření průřezu teoretickým základem příčin vzniku, možností eliminace výskytu a odstraňování usazenin z otopné soustavy, především teplosměnných ploch, otopných těles a výměníků. Představit metody chemického čištění vhodné pro teplovodní soustavy s ústředním zdrojem tepla. Podat přehled normativních předpisů, obecných projektových, technických a provozních doporučení s cílem vyvarovat se tvorbě usazenin a rizikům koroze. V experimentální části poté stanovení vlivu nánosů a kalů na účinnost modelové otopné soustavy.

3 Teoreticko-metodologická část

V teoreticko-metodologické části práce budou popsány principy a ovlivňující faktory tvorby úsad. Dále vztah k legislativě a teorie pro měření účinnosti zdrojů potřebná k experimentální části práce.

3.1 Literární rešerše a úvod do problému

Správná funkce otopné soustavy stejně tak jako kteréhokoli jiného zařízení je ovlivněna jejím technickým stavem. Pro zajištění spolehlivé účinné otopné soustavy s předpokladem dlouhé životnosti je třeba věnovat problému usazenin pozornost již od počátku fáze projektové přípravy. Při projekci je důležité systém logicky členit na funkční uzavíratelné celky s cílem omezit nutnost vypouštění soustavy na co nejmenší množství vody při lokální opravě prvku systému. V další fázi před uvedením do provozu se má soustava propláchnout a tím zbavit zbytků olejů a nečistot, které se do soustavy dostaly při výrobě a montáži. Při uvedení je do provozu je nutné sledovat parametry napouštěcí vody. Složení napouštěcí vody je velmi důležitým parametrem a někteří výrobci kotlů i u kotlů malých výkonů do 50 kW začínají vyžadovat jeho sledování. Parametry napouštěcí vody totiž mohou zásadním způsobem ovlivňovat životnost zařízení soustavy. Z tohoto důvodu se lze setkat i s případy, kdy správným složením napouštěcí vody výrobci podmiňují záruku.

V zásadě se v otopných soustavách mohou vyskytovat tři typy usazenin: kotelní kameny, korozivní kaly a bakteriový šlem. Důvody ke vzniku jednotlivých typů usazenin se různí a nevylučuje se ani jejich kombinace. Společným jmenovatelem pro všechny typy je to, že mají negativní vliv na provoz, účinnost a životnost otopné soustavy. O vlivu usazenin na provoz otopných soustav se obecně ví, základní norma ČSN EN 12 828 + A1 Tepelné soustavy v budovách – Navrhování teplovodních otopných soustav požaduje dodržení parametrů napouštěcí i oběhové vody, které jsou pro tvorbu usazenin zcela zásadní dle normy ČSN 07 7401 Voda a pára pro tepelná a energetická zařízení s pracovním tlakem páry do 8 Mpa. Norma ČSN 07 7401 ovšem řeší problematiku kvality topné vody pouze pro zdroje nad 60 kW. Stav techniky se od roku 1992, kdy byla tato norma naposledy aktualizována, také posunul, ale přesto může být i v případě soustav s výkonem nižším než 60kW tato norma dobrým vodítkem. Obecně se téměř veškerá dostupná literatura zaměřuje na problematiku velkých zdrojů nebo přípravu vody či páry pro průmyslové účely. V principu jsou ovšem tyto způsoby po zjednodušení uplatnitelné a skutečně se také uplatňují i v menším měřítku. Dosud nejkomplexnější z české literatury je

„Technická příručka pro pracovníky oboru úprav vody“ (Wünsch, 1981). Tato podniková literatura z ČKD podrobně popisuje: odběry vzorků, laboratorní postupy rozborů vody, vlivy jednotlivých složek vody na tvorbu usazenin a koroze. Dále příručka obsahuje způsoby technologických úprav parametrů vody pro různá použití včetně topné vody pro teplovodní soustavy. Na zmíněnou knihu se s příspěvkem nových trendů snaží navázat kniha „Úprava vody v energetice“ (Hübner, 2010) a její přepracované a doplněné vydání (Hübner, 2015). Obě knihy se velmi podrobně zabývají technologií úpravy vody a páry pro energetiku, zejména pro použití v elektrárenských a teplárenských provozech. Knihy od inženýra Hübnera jsou cíleny především čtenářům s hlubší znalostí chemie a technologických procesů úpravy vody. Jsou zde ovšem zajímavé kapitoly věnované tvorbě úsad, jejich složení, způsobu jejich minimalizace a čištění kotlů. Z česky psané literatury lze čerpat ještě ze sborníku přednášek „Úprava vody pro topné systémy“ (Bašta, 2002), kde jsou velmi věcným způsobem shrnuty požadavky na otopnou soustavu, chemické vlastnosti otopné vody a představeny možnosti odplynění a úpravy chemických parametrů. Z cizojazyčné literatury se problematikou úprav topné vody a řešením koroze a úsad v technických systémech zabývá především německá VDI 2035. Tento předpis (VDI – Verein Deutscher Ingenieure) vytvořený sdružením německých inženýrů je asi nejkompaktnějším zdrojem informací pro danou problematiku. Dělí se na tři části. VDI 2035-1 (2005) se zabývá tvorbou kotelního kamene, VDI 2035-2 (2009) je zaměřena na korozi systému na straně vody a předmětem VDI – 2035-3 je pak koroze výměníků na straně spalin. Obecnou rovinou problematiky přestupu tepla a zanášení výměníků (anglicky zvané fouling) se zabývá řada studií a zahraničních publikací. Velmi obsáhlou a komplexní je například publikace „Fouling of heat exchanger“ (Bott, 1995), naopak věcně shrnující je studie „Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces“ (Kazi, 2012).

Protože dostupná literatura byla staršího data nebo se zkoumané problematiky týkala jen částečně, moderní poznatky jsem se snažil čerpat i z dalších zdrojů. V první řadě to byla účast na odborných seminářích „Čištění otopných a energetických zařízení“ (Kreibich, Stoulil, 2016). Zde byly představeny příklady praktické aplikace čištění od malých soustav až po velké zdroje typu tepláren a elektráren. Doktor Stoulil představil výsledky výpočtu potenciálu úspor čištění na příkladu modelového objektu. Dalším seminářem, ze kterého budu informačně vycházet, je školení firmy AV-EQUEN „Čištění otopných soustav“ (Hoša, 2016). Zde byl představen praktický postup analýzy usazenin, chemický postup čištění soustav do objemu 1500 litrů a také teoretický blok o zajištění parametrů napouštěcí vody. Zdrojem informací pro tuto práci budou také články z webu „Provozní předpoklady kondenzačních kotlů“ (Bašta, 2006) a „Problematika plynů v otopných systémech“ (Vaněk, 2009). V části přípravy experimentu budu čerpat

informace také z článků „Stanovení účinnosti kotlů“ (Horák et al., 2014), který shrnuje legislativu zkoušení účinnosti kotlů, popisuje a omezuje vhodnost použití přímé metody a metody ztrát při stanovení účinnosti. Při výpočtu účinnosti zdroje budu vycházet z metodiky normy ČSN EN 15502-1 + A1 – Kotle na plynná paliva pro ústřední vytápění. Inspirací a zdrojem poučení ve fázi experimentu mi budou také informace ze zprávy o měření účinnosti při uměle vyvolaném zanášení soustavy od společnosti Sentinel „Independens study shows sludge build-up significantly affects central heating system performance“ (1).

3.2 Příčiny znečištění teplovodních otopných soustav

Příčiny znečištění lze z časového hlediska rozdělit do několika skupin:

- znečištění samotných prvků soustavy během výroby či montáže před zahájením provozu
- znečištění při zahájení provozu způsobené napouštěním vody o nevhodných parametrech
- znečišťování během provozu, netěsnost soustavy dotace kyslíku, produkty chemických reakcí mezi otopnou vodou a materiálem soustavy, migrace iontů atd.

Teplonosnou kapalinou většiny teplovodních systémů v uvažovaném segmentu je voda. Voda se v přírodě nevyskytuje v chemicky čisté formě. Kromě čisté vody a řady stopových součástí voda dle Wünscha (1981) dále obsahuje:

a) plyny – O_2, CO_2, N_2

b) anionty – $HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, NO_3^-, NO_2^-$

kationty – $Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, NH_4^+$

c) koloidně rozpuštěné látky

anorganické – gel kyseliny křemičité, hydroxidy železa a manganu, hydroxid hlinitý a hořečnatý, jílové minerály (kaolinit, illit, montmorillonit), živce

organické – huminové látky, uhlohydráty, mastné kyseliny

d) nerozpuštěné látky

anorganické – jílové minerály, hydroxidy, uhličitany

organické – rostliny, organismy, mikroorganismy

Z tohoto výčtu možných činitelů vzniku usazenin a kalů jsou naštěstí obvykle zásadní jen některé. „Ve vodovodní vodě, která je upravována a která se nejčastěji používá k plnění a doplnění teplovodních otopných soustav, jsou nerozpuštěné látky odstraňovány filtrací a organické látky čířením“ (Bašta, 2002, str.8). Za předpokladu, že napouštěcí voda bude z vodovodního řádu, není obvykle třeba uvažovat nerozpuštěné anorganické látky. S organickými látkami, zejména bakteriemi, je situace komplikovanější. Jejich stoprocentní absence ve vodovodním řádu lze dosáhnout jen obtížně. I předpisy pro kvalitu pitné vody jejich přítomnost do limitní hodnoty připouštějí. V některých případech mohou otopné systémy pro tyto mikroorganismy tvořit vhodné prostředí a umožnit jejich rozmnožení a tvorbu slizovitých útvarů, tzv. zoogly, které mají na otopné soustavy nepříznivý vliv. Z tohoto důvodu lze doporučit zejména u nízkoteplotních soustav počítat i s možnostmi tohoto činitele.

V následujících částech práce budu uvažovat pouze použití napouštěcí vody z vodovodního řádu. Napouštění teplovodních otopných soustav vodou studniční, povrchovou či jinou je nutné se vyvarovat. Zásadním problémem použití jiné než vodovodní vody, kromě pravděpodobného vyššího výskytu nerozpuštěných anorganických a zejména organických látek je absolutní neznalost jejich dalších parametrů, jako je alkalinita, tvrdost, pH, vodivost, obsah síranů, chloridů, fosforečnanů atd. U vodovodní vody lze z výsledků povinných pravidelných rozborů dodavatele vody parametry dohledat.

Z látek rozpuštěných ve vodě je s ohledem na korozi a vznik korozivních kalů důležitý zejména obsah O_2 , CO_2 , NO_2^- , Cl^- , SO_4^{2-} . Pro tvorbu úsad je zásadní obsah SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} a všechny ostatní koloidní a nerozpuštěné látky (Wünsch, 1981). I po mírném omezení je počet činitelů znečištění otopných soustav poměrně vysoký, což předznamenává značnou složitost problému z pohledu chemického, kterou se tato práce nemá ambici do hloubky zabývat. Rozsáhlejší popis chemických dějů je možné dohledat v relevantní literatuře, například Hübner (2015). Nicméně s ohledem na skutečnost zásadního významu chemie při procesu znečišťování v tepelných soustav budou v následujících podkapitolách základní parametry vody a principy tvorby usazenin a kalů zmíněny.

3.2.1 Tvrdost (obsah vápníku a hořčíku)

Vodu z vodovodního řádu nelze chápat jako chemicky čistou látku, ale jako roztok, ve kterém může být obsaženo široké spektrum látek (viz kapitola 3.2). Jeden ze základních parametrů pro stanovení vlastností vody je tvrdost, která vyjadřuje právě množství látek, především vápníku a hořčíku, v ní rozpuštěných. Přesněji je možné definovat jako „Tvrdost je součet

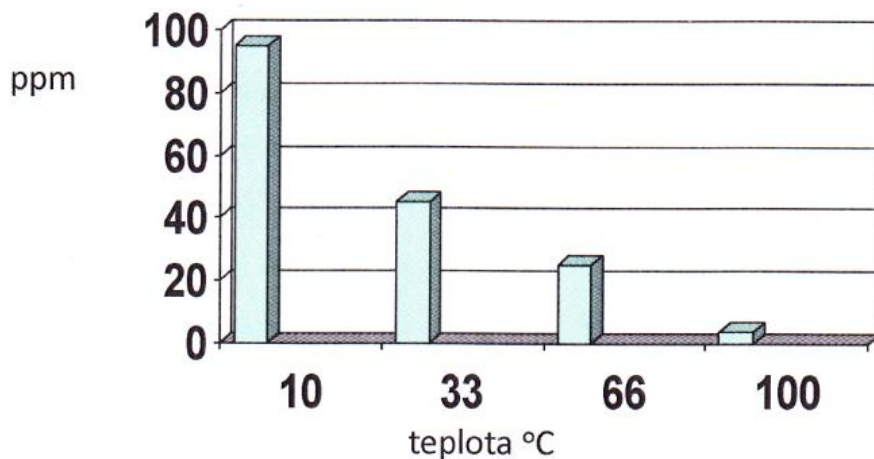
ekvivalentových koncentrací iontů hořčíku, vápníku a ostatních kovů žíravých zemin“ (Wünsch, 1981, str. 37). Tvrdost „celková“ se vzhledem k různému chování těchto solí ve vztahu k rozpustnosti dá vyjádřit jako součet dvou dílčích složek, přechodné „karbonátní“ a stále „nekarbonátní“ tvrdosti.

Přechodná tvrdost

Vyjadřuje obsah rozpuštěného $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (hydrogenuhličitanu vápenatého) a $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ (hydrogenuhličitanu hořečnatého). Jedná se o bílé krystalické látky, v podstatě jde o soli kyseliny uhličitě rozpuštěné ve vodě. Přesněji definuje například Bašta (2002, str. 9): „Karbonátová tvrdost je podíl Ca^{2+} a Mg^{2+} iontů vyvážený hydrogenuhličitanovým iontem HCO_3^- “. Rozpustnost těchto látek ve vodě je významně závislá na teplotě a tlaku. Vliv tlaku vody na rozpustnost je v podmínkách teplovodních otopných soustav na rozdíl od teploty zanedbatelný. Při zahřívání vody se rozpustný $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ rozkládá na CaCO_3 – vodní kámen, H_2O – vodu a CO_2 – oxid uhličitý dle chemické rovnice 1.01 :



Závislost rozpustnosti uhličitanu vápenatého na teplotě je znázorňuje graf na obrázku 1.01



Obr. 1.01 Závislost rozpustnosti CaCO_3 na teplotě vody. (2)

Po převaření vody v ní už téměř žádný $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ nezůstane. Zatímco původní hydrogenuhličitan vápenatý je ve vodě rozpustná látka, uhličitan vápenatý CaCO_3 vzniklý jeho přeměnou je ve vodě téměř nerozpustný a tvoří úsady na vnitřních stěnách otopných soustav. U $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ probíhá reakce obdobným způsobem, rozpad je ovšem pouze částečný.

Pro vyjádření koncentrace solí se používají jednotky látkového množství [mmol/l]. V technické praxi na našem území jsou ale více zavedené německé stupně tvrdosti [°dH]. Ve světě se dále

používají také francouzský [$^{\circ}\text{fH}$], anglický [$^{\circ}\text{eH}$], americký stupeň [$^{\circ}\text{aH}$] nebo milival [mval/l]. K převodu mezi jednotlivými jednotkami lze použít tabulku 1.01.

Tab. 1.01 Převodní tabulka jednotek tvrdosti vody

	$^{\circ}\text{dH}$	$^{\circ}\text{eH}$	$^{\circ}\text{fH}$	$^{\circ}\text{aH}$	mval/l	mmol/l	mg CaO/l	$\mu\text{S/cm}$	ppm
1 $^{\circ}\text{dH}$	1	1,25	1,79	1,04	0,357	0,178	10	29	17,8
1 $^{\circ}\text{eH}$	0,8	1	1,43	0,83	0,286	1,43	8	23,2	14,3
1 $^{\circ}\text{fH}$	0,56	0,7	1	0,58	0,2	0,1	5,58	16,2	10
1 $^{\circ}\text{aH}$	0,96	1,2	1,71	1	0,343	0,17	9,6	27,8	17,09
1 mval/l	2,8	3,5	5	3,23	1	0,5	27,77	81,2	50
1 mmol/l	5,6	7	10,02	5,82	2	1	55,55	182,4	100
1 mg CaO/l	0,1	0,125	0,179	0,104	0,036	0,018	1	2,9	1,78
1 $\mu\text{S/cm}$	0,035	0,043	0,062	0,036	0,012	0,006	0,345	1	0,614
1 ppm	0,056	0,07	0,1	0,058	0,02	0,01	0,562	1,63	1

Zdroj: (3)

Zpracoval: autor

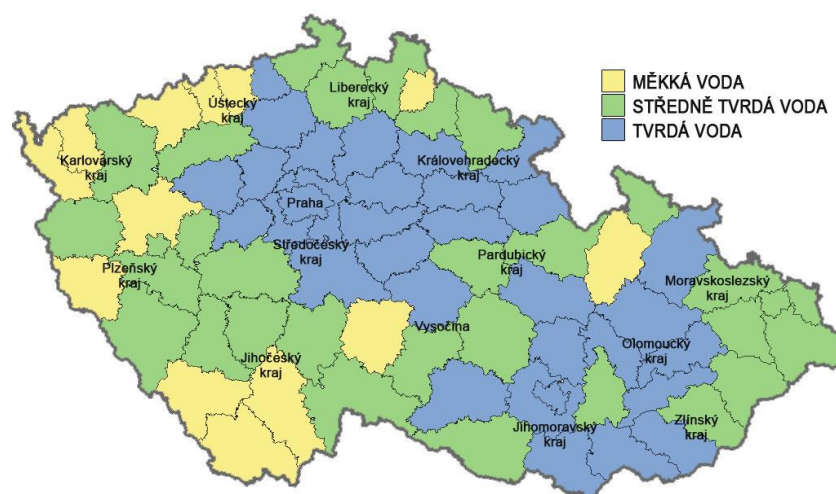
S ohledem na různé složení půdy, která s vodou v přírodě a ve vodních zdrojích přichází do styku, je v České republice značně rozdílná také tvrdost vody ve vodovodním řadu, viz orientační mapa tvrdosti na obrázku 1.02. Hygienické požadavky na pitnou vodu stanovuje vyhláška č. 252/2004, Sb., která tvrdost vody (součet koncentrací vápníku a hořčíku) pouze doporučuje v rozmezí 2,5–3,5 mmol/l, což odpovídá 14–19,6 ($^{\circ}\text{dH}$). Tabulka 1.02 znázorňuje v praxi obvykle uvažované slovní hodnocení tvrdosti vody.

Tab. 1.02 Slovní hodnocení tvrdosti

velmi měkká	měkká	středně tvrdá	tvrdá	velmi tvrdá
< 0,7 (mmol/l)	0,7–1,3 (mmol/l)	1,3–2,1 (mmol/l)	2,1–3,2 (mmol/l)	3,2–5,3 (mmol/l)
0–4 ($^{\circ}\text{dH}$)	4–7 ($^{\circ}\text{dH}$)	7–12 ($^{\circ}\text{dH}$)	12–18 ($^{\circ}\text{dH}$)	18–30 ($^{\circ}\text{dH}$)

Zdroj: (4)

Zpracoval: autor



Obr. 1.02 Orientační mapa tvrdosti vody ve vodovodním řadu ČR. (5)

Stálá tvrdost

Stálá neboli nekarbonátní tvrdost bývá ve starší odborné literatuře označovaná také jako tvrdost sulfátní, což naznačuje, že jde především o rozpuštěné sloučeniny síry. Podle doc. Panáčka je nekarbonátovou tvrdostí podíl Ca^{2+} a Mg^{2+} iontů vyvážený ionty SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , čím vznikají sloučeniny jako síranový kámen CaSO_4 nebo MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 . Na rozdíl od uhličitanových sloučenin mají tyto sloučeniny výrazně vyšší rozpustnost ve vodě, a proto se jejich výskyt v běžných teplovodních otopných soustavách jeví jako nepravděpodobný. Změnou teploty vody v soustavě tedy dochází ke změně pouze přechodné, nikoli stálé tvrdosti (Bašta, 2002).

3.2.2 pH

Tento velmi důležitý parametr určuje, zda voda reaguje kyselé či zásadité. V zásadě tento parametr vypovídá o poměru množství disociovaných iontů H^+ a OH^- . Výpočet vychází z premisy, že v jednom dm^3 čisté vody o teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 100 kPa je iontový součin kationtů H^+ (10^{-7}) a aniontů OH^- (10^{-7}) roven 10^{-14} mol. pH je poté zápornou hodnotou dekadického logaritmu aktivních vodíkových iontů H^+ dle rovnice 1.02.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad \{1.02\} \quad (\text{Bašta, 2002, str. 7})$$

Pro přehlednost je možné hodnotu pH zařadit dle známé stupnice, viz obrázek 1.03.

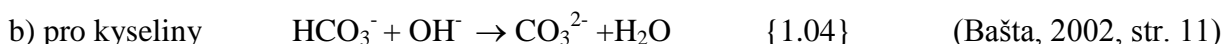
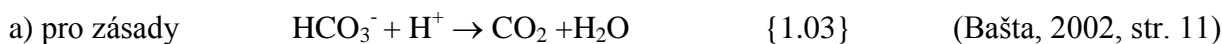


Obr. 1.03 Spektrum pH (6)

Vliv pH je třeba posuzovat s ohledem na materiál soustavy, což bude blíže popsáno v kap. 3.4. Dále s ohledem na tvorbu ochranných vrstev a úsad. V kyselém prostředí ($\text{pH} < 6$), kde se nemohou tvořit úsady, riziko koroze vzrůstá s klesající hodnotou pH a koncentrací kyslíku. Zvyšující se koncentrace vodíkových iontů, tedy pokles pH, ovlivňuje tendenci k bodové a důlové korozi. Teprve při vyšších koncentracích OH^- dochází k přechodu na rovnoměrnější korozi v pasivním stavu (Wünsch, 1981).

3.2.3 Alkalita

Jde o vyjádření míry tzv. ústojné kapacity vody proti působení kyselin a zásad. Tato ústojná kapacita závisí na množství ve vodě přítomných hydrogenuhličitanů. Reakcí s kyselinami a zásadami se koncentrace hydrogenuhličitanů v roztoku snižuje dle rovnic 1.03 a 1.04.



Z předešlého je zřejmé, že hodnota alkality určuje pH stabilitu vody na základě množství rozpuštěných látek. Podle toho, jaké má voda pH, lze stanovit dvě hodnoty KNK kyselinové nebo ZNK zásadové neutralizační kapacity dle tabulky 1.03.

Tab. 1.03 Určení parametru alkality podle pH vzorku

pH vzorku	Lze stanovit
pH < 4,5	ZNK _{4,5} , ZNK _{8,3}
4,5 < pH < 8,3	KNK _{4,5} , ZNK _{8,3}
pH > 8,3	KNK _{4,5} , KNK _{8,3}

Zdroj: (Horáková, 2000)

Index 4,5 a 8,3 značí, na jakou hodnotu pH bylo titrací (zásadou či kyselinou) dosaženo.

KNK_{4,5} (dříve m-hodnota)

V zásadě vyjadřuje, kolik 0,1 mol silné jednosytné kyseliny je třeba přidat, aby voda dosáhla hodnoty pH 4,5. Předpokládá se totiž v návaznosti na obrázek 1.04, že při dosažení hodnoty pH 4,5 je ve vodě už nulová koncentrace hydrogenuhličitanů (HCO_3^-). Přírodní vody obvykle vykazují pH mezi 4,5–8,3, proto se pro ně nejčastěji stanovuje pouze tato hodnota.

KNK_{8,3} (dříve p-hodnota)

Stanovuje, kolik 0,1 mol silné jednosytné kyseliny je třeba přidat, aby roztok dosáhl hodnoty pH 8,3. Předpokládá se totiž v návaznosti na obrázek 1.04, že při dosažení hodnoty pH 8,3 je ve vodě už nulová koncentrace volného CO_2 . Hodnoty pH ve vodě teplovodních soustav se mohou vyskytovat někdy i záměrně nad 8,3, v takovém případě lze stanovit i KNK_{8,3}.

3.2.4 Solnost – iontově rozpuštěné látky, konduktivita

Solnost v literatuře obvykle vyjadřuje celkovou sumu koncentrace všech iontově rozpuštěných látek. V podstatě jde o součet tvrdosti (obsahu vápníku a hořčíku), chloridů a siřičitanů

vyjádřený v mol/l nebo mg/l. Tento parametr lze dle Horákové (2000, str. 71) vyjádřit analytickým výpočtem jednotlivých látek na základě rozboru nebo iontovou výměnou na měničích kationtů a stanovením $KNK_{4,5}$. Obsah iontově rozpuštěných látek může také sloužit pro kontrolu správnosti provedení rozboru vody, neboť suma látkového množství iontů vynásobená příslušnými nábojovými čísly látek se při správně provedeném rozboru vody nemá lišit o více jak 5 %. Z předchozího textu vyplývá poměrná náročnost přesného určení obsahu iontově rozpuštěných látek. V praxi pro bezprostřední odhad lze solnost odvodit od konduktivity (elektrické vodivosti) roztoku. Spojitost mezi konduktivitou a nárůstem rozpuštěných iontových látek je známa, neboť čistá voda (což je například voda po vícenásobné destilaci nebo demineralizaci) je velmi málo vodivá – $5,5 \mu S \cdot cm^{-1}$. Například říční voda má běžně hodnoty kolem $500 \mu S \cdot cm^{-1}$ (Hübner, 2015, str. 13). Pro vyjádření konduktivity se používá jednotka elektrické vodivosti Siemens v základním tvaru $S \cdot m^{-1}$, což je převrácená hodnota elektrického odporu mezi dvěma elektrodami o ploše $1 m^2$ od sebe vzdálené 1 m. V praxi se často používají i odvozené jednotky, viz převodní tabulka 1.04.

Tab. 1.04 Převodní tabulka užívaných jednotek konduktivity

	$mS \cdot m^{-1}$	$\mu S \cdot cm^{-1}$
$1 S \cdot m^{-1}$	1000	10 000

Zdroj: (Horáková, 2000)

Konduktivita vody je kromě samotné koncentrace iontů, jejich nábojů a pohyblivosti silně závislá na její teplotě. Jak postulují Horáková (2000, str. 67), „Změna teploty o $1^\circ C$ způsobuje změnu konduktivity nejméně o 2 %, proto má temperování vzorků při stanovení jeho konduktivity značný význam“. Obvykle se konduktivita stanovuje při teplotě vzorku vody $25^\circ C$ (κ_{25c}).

V případě potřeby bezprostředního odhadu solnosti bez chemického rozboru vody lze použít dle doc. Panáčka vztahový přepočít viz rovnice 1.05.

$$S = \kappa_{25c} \cdot f \quad [mg/l] \quad \{1.05\} \quad (\text{Bašta, 2002, str. 8})$$

Kde (κ_{25c}) je změřená konduktivita při $25^\circ C$ v $[\mu S \cdot cm^{-1}]$

f je součinitel (pro přírodní vodu 0,7 pro upravené vody 0,5) [-]

3.2.5 Mikrobiální aktivita – vliv bakterií a řas

V prakticky každé vodě, vodu z vodovodního řadu nevyjímaje, se vyskytují určité koncentrace bakterií. Z hlediska provozu nám tyto mikroorganismy vadí ze dvou důvodů. Prvním důvodem je jejich fyzická existence spojená s tvorbou biologických nánosů, které zvyšují tlakové ztráty a odpor při přestupu tepla. Druhým důvodem škodlivosti výskytu mikroorganismů jsou změny chemického složení vody vlivem jejich metabolické činnosti, které často působí korozivně.

V literatuře (Wünsch, 1981, str. 177) se původci mikrobiální zanášení dělí na bakterie aerobní a anaerobní jejichž korozivní reakce se od sebe liší. Aerobní železitě a thiové bakterie oxidují železnaté soli na železitě, čímž mohou podstatně snížit pH vody. Anaerobní bakterie desulfurikační redukují siřičitany, tím usnadňují katodickou depolarizaci a korozi kovových materiálů.

Společným jmenovatelem pro všechny druhy bakterií je to, že umožňují tvorbu slizových útvarů biofilmu (zooglea). „*Biofilmy způsobují změny v koncentraci kyslíku a pH mezi vrchní hranicí biofilmu a vrstvou přiléhající k povrchu kovu*”. (Hübner, 2015, str. 438). Lokální změnou koncentrace kyslíku vzniká potenciál pro vytvoření korozivního článku, což může mít za následek elektrochemickou bodovou korozi materiálu.

3.2.6 Kotelní kámen – vliv hydrogenuhličitanových a vápenných iontů

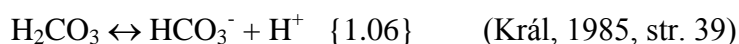
Z hlediska vzniku kotelního kamene je zásadní teplota, obsah oxidu uhličitého CO_2 , pH vody a přechodná tvrdost (obsah vápníku a hořčíku rozpuštěného ve vodě). Oxid uhličitý se stejně, jako většina ostatních plynů, do vody může dostat a rozpustit ze třech zdrojů:

- a) difuzí z atmosféry
- b) chemickým působením, např. vulkanickou činností nebo rozkladem kyseliny H_2CO_3
- c) biochemickým působením čili rozkladem látek při anaerobních a aerobních procesech.

Výskyt CO_2 ve vodě je možný ve formě volné nebo vázané. Volná forma představuje především molekulární formu tzv. volný oxid uhličitý a CO_2 obsažený v kyselině uhličitě H_2CO_3 , která vzniká reakcí $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Vázaná forma představuje CO_2 obsažený v iontech hydrogenuhličitanů (HCO_3^-) a uhličitanů (CO_3^{2-}) solí alkalických zemin. Součet volného CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} vyjadřuje veškerý obsah oxidu uhličitého ve vodě.

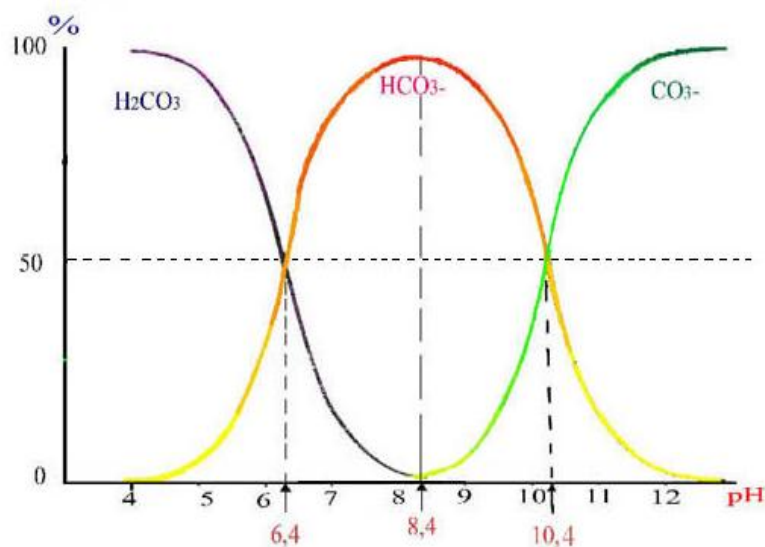
Obsah volného CO_2 má základní význam nejen pro tvorbu kotelního kamene, ale i pro chování vody obecně, protože zásadním způsobem ovlivňuje její pH. Ke změně pH dochází, neboť kyselina uhličitá, která vzniká při reakci vody a oxidu uhličitého, se následně štěpí (disociuje) na ionty za vzniku hydrogenuhličitanového aniontu a kationtu vodíku. Koncentrace vodíkových kationtů je pak ukazatelem pH (viz kapitola 3.2.2.) Vyjádření poměrného molárního zastoupení forem CO_2 ve vztahu k pH vyjadřuje graf na obrázku 1.04.

Obousměrně platná rovnice 1.06 popisuje disociaci kyseliny uhličitě ve vodném roztoku



„Normální uhličitany vápníku a hořčíku (CaCO_3 a MgCO_3) jsou v čisté vodě velmi málo rozpustné. Stýkají-li se s vodou obsahující volný CO_2 , rozpouštějí se za tvorby hydrogenuhličitanů“ (Král, 1985, str. 39). Při ztrátě CO_2 , což je děj spojený s ohříváním vody, se naopak vylučují. To lze chápat jako nárůst kotelního kamene.

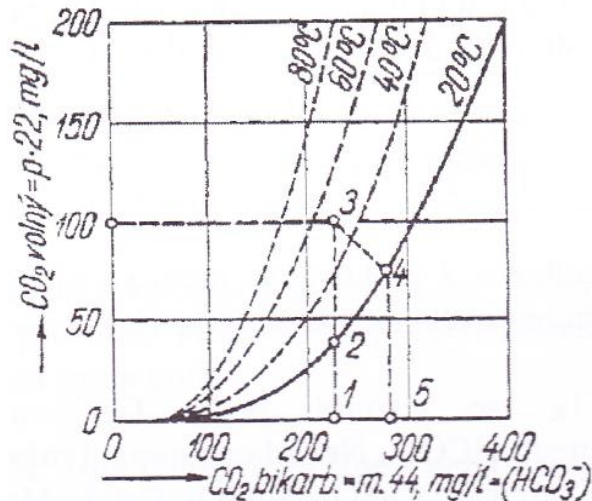
Obousměrně platná rovnice 1.07 popisuje tzv. uhličitanovou rovnováhu vody



Obr. 1.04 Zastoupení forem CO_2 ve vodě v závislosti na pH (7)

Z grafu na obrázku 1.05 vyplývá, že hydrogenuhličitanový iont (HCO_3^-) potřebuje ke své existenci přítomnost rovnovážného volného CO_2 , jehož množství se mění s koncentrací HCO_3^- a teplotou. Jestliže bude obsah CO_2 vyšší, než vyžaduje rovnováha s HCO_3^- na křivce příslušné teploty, bude množství CO_2 nad křivkou rovnováhy při dané teplotě vody agresivně reagovat

s vnitřním povrchem otopné soustavy. V případě, že na povrchu stěn je z předešlého provozu úsada CaCO_3 , bude ji rozpouštět a zvyšovat množství HCO_3^- . Jestliže na stěnách CaCO_3 nebude, bude plošně korozivně působit přímo na kovové prvky soustavy až do ustanovení rovnováhy (Bašta, 2002, str. 10).



Obr. 1.05 Rovnováha HCO_3^- a CO_2 (Bašta, 2002)

„Náhled při sledování tendence vody ke korozi kovových materiálů, respektive k tvorbě úsad, si lze přiměřeně spolehlivě vytvořit použitím výpočtu Langelierova saturačního indexu nebo více používaného Ryznarova indexu stability vody“ (Vosmík, 2014, str. 10). Podobným způsobem, tzn. jako k prostředku prvotního náhledu nad možnostmi použití fyzikální úpravy vody k Ryznarově indexu přistupuje ve svém článku i doc. Panáček (2003).

Principem Ryznarova indexu stability (RSI) (viz rovnice 1.08) je porovnání skutečně naměřeného pH se saturačním pH_s , což je teoretická vypočtená hodnota pH, které by voda dosáhla, kdyby při daném složení byla v tzv. uhličitánové rovnováze.

$$\text{RI} = 2 \text{pH}_s - \text{pH} [-] \quad \{1.08\} \quad (\text{Zábranská, 1997, str. 49})$$

Tendenci ke korozi či k tvorbě úsad poté vyjadřuje tabulka 1.05

Tab. 1.05 Interpretace hodnot Ryznarova indexu stability

Chování vody	Sklon k tvorbě úsad	Stabilní oblast	Sklon ke korozi
Ryznarův index stability	<6	6–7	7<

Zdroj: (Wünsch, 1981)

Zpracoval: autor

V případě, že skutečně naměřené pH vody je menší než 9,5, je možné pro výpočet saturačního pH_s použít zjednodušeně vztah dle vzorce 1.09:

$$\text{pH}_s = (\text{p}K_2 - \text{p}K_S + \text{p}y_1 + \text{p}y_2) + \text{p}m_{\text{Ca}} + \text{p}m_{\text{HCO}_3} \quad \{1.09\} \quad (\text{Wünsch, 1981, str. 175})$$

$\text{p}K_2 - \text{p}K_S$ – rozdíl disociační konstanty kyseliny uhličitě a součinu rozpustnosti CaCO_3 dle tabulky 1.06

Tab. 1.06 Závislost $pK_2 - pK_S$ na teplotě

t [°C]	0	10	20	25	50	60	70	80	90
$pK_2 - pK_S$ [-]	2.20	2.09	1.99	1.94	1.73	1.65	1.58	1.50	1.44

Zdroj: (Wünsch 1981, str. 196)

pm_{Ca} – obsah Ca v [mmol/l]

pm_{HCO_3} – obsah HCO_3 v [mmol/l]

$py_1 + py_2$ – konstanta vycházející ze solnosti, viz rovnice 1.10

$$py_1 + py_2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot A \cdot S^{1/2} \quad \{1.10\} \quad (\text{Wünsch, 1981, str. 175})$$

A – konstanta pro vodné roztoky = 0,509 při 25 °C

S – solnost v [g/ml¹], viz rovnice 1.11

$$S = K_{25C} f \quad \{1.11\} \quad (\text{Wünsch, 1981, str. 175})$$

Součinitel f lze dle doc. Bubeníčka uvažovat 0,7 pro přírodní vodu a 0,5 pro vodu upravenou. Tento vztah je použitelný do koncentrace solí 5000 mg/l (Bašta, 2002, str. 8).

3.2.7 Koroze – vliv O_2 , H_2 , CO_2

Problematika koroze je značně obsáhlá, s velkým přesahem do mnoha vědních odvětví, jako chemie a korozní inženýrství. S ohledem na rozsah a zaměření práce zde bude uveden pouze nutný základ pro ucelenost díla a pochopení vazby na funkci teplovodních systémů vytápění. „Koroze je obecně chápán destruktivní výsledek chemické nebo fyzikálně-chemické reakce mezi materiálem a prostředím“ (Hübner, 2015, str. 173). Pojem koroze je spojen zejména s kovovými materiály, ale obecně jí podléhají například i keramické materiály nebo plasty. V podstatě se jedná o schopnost povrchu kovů vstupovat do reakcí se složkami prostředí, v němž se nachází.

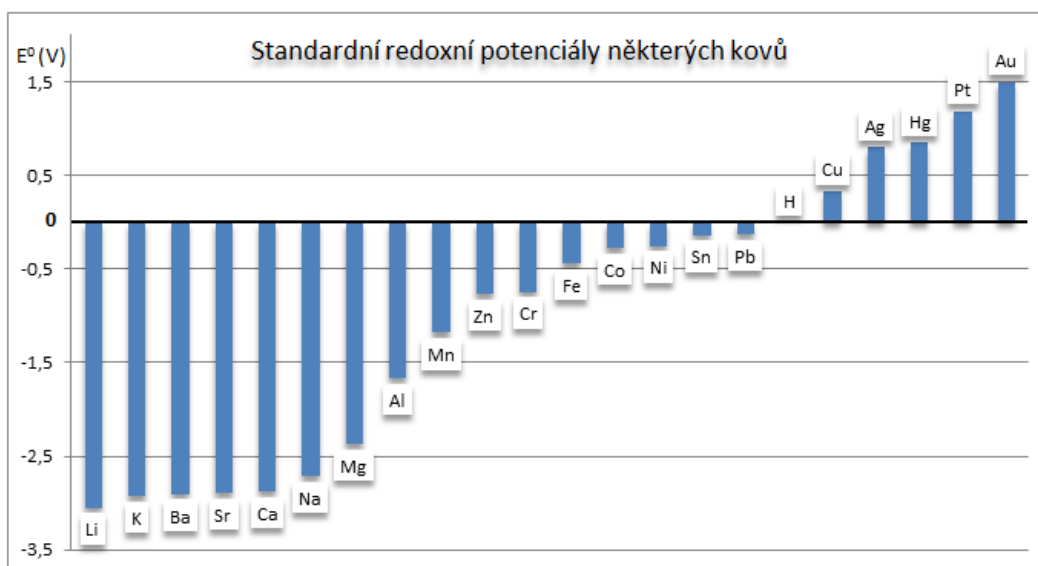
Všechny korozní reakce pak mají za následek přechod kovů do stabilnějších sloučenin. Podle prostředí, ve kterém probíhá, lze korozi rozdělit na chemickou, která probíhá v elektricky nevodivém prostředí a elektrochemickou, která probíhá v elektricky vodivém prostředí. V oblasti teplovodních otopných soustav se lze setkat převážně s korozí elektrochemickou, neboť teplotonosná kapalina (voda) zde působí jako elektricky vodivé prostředí (elektrolyt).

Z pohledu odlišnosti korozních projevů lze v odborné literatuře nalézt různá členění, například rozdělení dle VDI 2035-2 zahrnuje tyto typy:

- rovnoměrná povrchová koroze
- důlková (bodová) koroze
- bimetalická koroze
- koroze pod usazeninami
- kavitační koroze
- koroze v úrovni hladiny vody
- erosivní koroze
- koroze pod napětím (korozní praskání)
- koroze vlivem mikroorganismů

Více informací, podrobný popis, příčiny vzniku a jejich vliv s ohledem na druh kovu a parametry vody lze nalézt ve VDI 2035-2 nebo odborné literatuře, například Hübner (2015). V textu této kapitoly se v obecné rovině zaměřím pouze na dva nejzákladnější typy, tedy rovnoměrnou a lokální bodovou korozi.

Zjednodušeně lze říci, že elektrochemickou korozi tvoří korozní (galvanický) člunek jednoho nebo více kovů ve vodivém prostředí. Člunek vzniká na rozhraní různých kovů nebo kovu a vody jako potenciál napětí umožňující migraci elektronů a iontů z anody ke katodě. Potenciál napětí je dán rozdílem v takzvané řadě ušlechtilosti kovů, přesněji standardním redoxním potenciálem, viz obrázek 1.06.

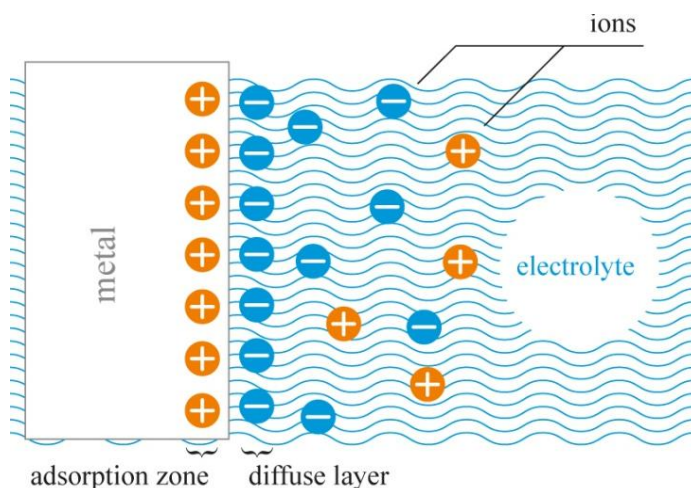


Obr. 1.06 Standardní redoxní potenciál některých kovů (8)

Na rozhraní mezi kovem a vodou je potenciál dán standardním redoxním potenciálem kovu a takzvanou iontovou silou vody, která je závislá především na jejím pH.

V technické praxi je elektrochemická koroze velmi dobře známá, je nutné s ní počítat v mnoha oborech. Dobrým příkladem může být návrh kotvení plechové krytiny z mědi. Tato krytina má vysoký redoxní potenciál a bude tedy při styku s většinou kovů působit jako katoda. Z tohoto důvodu nelze jako materiál kotvicích prvků (příponky, hřebíky) použít běžnou uhlíkovou ocel, pozinkovanou ocel ani hliník, neboť jejich redoxní potenciál je nižší a v chemické reakci s mědí by se staly rozrušovanou anodou. Vzhledem k nepoměrné velikosti anody a katody by velmi pravděpodobně došlo k rychlému koroznímu napadení kotvicích prvků. Na tomto představitelném příkladu z praxe lze demonstrovat princip galvanického „makročlánku“, který v otopné soustavě může při nevhodné kombinaci materiálů rovněž nastat. Zejména však snad vytvoří uchopitelnější představu o principu korozního článku mezi kovem a vodou na vnitřní povrchu kovových částí soustavy, kterému se bude práce věnovat nyní.

Při elektrochemických reakcích, mezi které korozní reakce patří, látky přijímají nebo ztrácejí elektrony a mění se jejich oxidační stupeň. Na styku kovu a elektrolytu, například vnitřního povrchu výměníku a vody, se kov nabíjí kladně a vytvoří se na něm elektrická dvojná vrstva, viz obrázek 1.07.

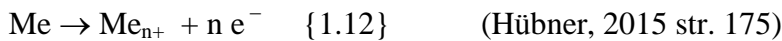


Obr. 1.07 Zjednodušená představa dvojně vrstvy (9)

V případě, že není zajištěn odběr elektronů, dosáhne kov rovnovážného potenciálu, čímž se ionizace a korozní reakce prakticky zastaví. Aby mohla koroze probíhat kontinuálně, je třeba přítomnost látky odebírající elektrony. Látky s touto redukční schopností se nazývají depolarizátory. Jako depolarizátory mohou ve vodném prostředí působit zejména kyslík a vodík. Z tohoto důvodu je riziko koroze zásadním způsobem ovlivněno obsahem těchto plynů rozpuštěných ve vodě, jakožto i obsahem CO_2 , ve kterém je kyslík také zastoupen. To naznačuje,

že primární obsah rozpuštěných plynů v soustavě není jediným zdrojem depolarizátorů, neboť ty se mohou v soustavě tvořit jako dílčí produkty jiných reakcí nebo například metabolickou produkcí mikroorganismů.

Korozní reakce vždy obsahují dva druhy reakcí, anodické a katodické. Oba druhy reakcí probíhají současně. V případě anodické části reakce vyjádřené 1.12 se rozpouští kov za produkce kovových iontů a elektronů.

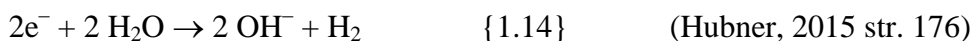


Elektrony uvolněné rozpuštěním kovů jsou spotřebovávány v katodické části reakce přeměnou (redukci) kyslíku podle rovnice 1.13 nebo reakcí s vodou podle rovnice 1.14.

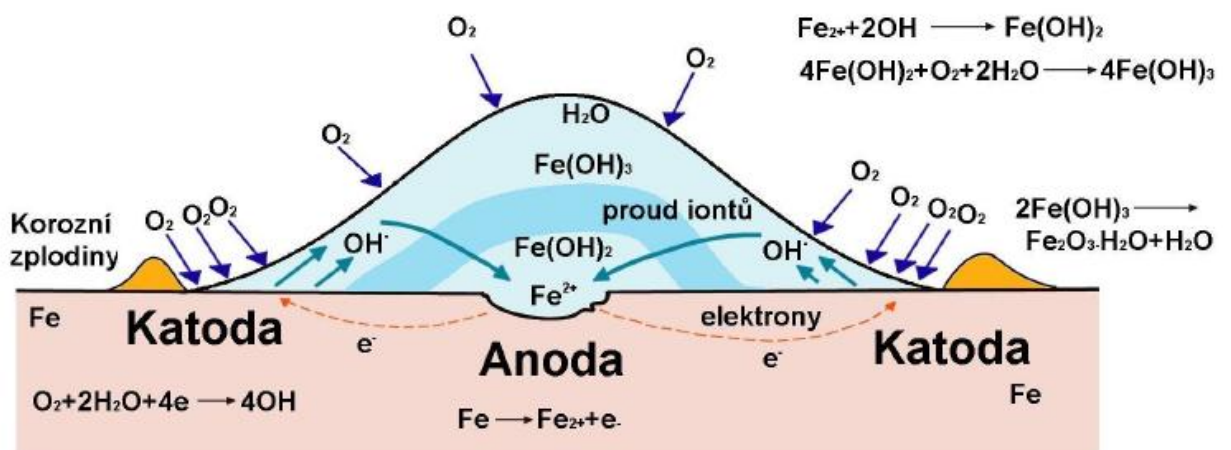
Koroze s kyslíkovou depolarizací



Koroze s vodíkovou depolarizací



Lepší představu o tomto ději umožňuje ilustrace znázorňující korozi běžné oceli z práce ing. Vosmíka na obrázku 1.08.

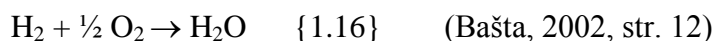


Obr. 1.08 Schéma reakcí při elektrochemické koroze (Vosmik, 2014)

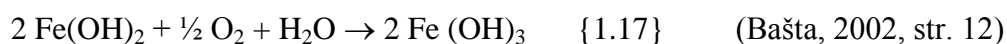
Chemismus korozivního působení rozpuštěného kyslíku v soustavě z běžné oceli popisuje doc. Panáček (Bašta, 2002). Ocel se působením kyslíku rozpouští za vzniku málo rozpustného $\text{Fe}(\text{OH})_2$ dle rovnice 1.15



V neutrálním prostředí se spotřebovává vodík vzniklý korozní reakcí a vzniká voda dle rovnice 1.16:



Za přítomnosti kyslíku v neodplyněné soustavě dochází k oxidaci vzniklého $\text{Fe}(\text{OH})_2$ na rez dle rovnice 1.17, která tvoří objemné porézní nánosy:



Na druhou stranu, v odplyněné vodě dochází k tepelnému rozkladu $\text{Fe}(\text{OH})_2$ za vzniku Fe_3O_4 , což je magnetit, který tvoří základ ochranné pasivační vrstvy na povrchu teplosměnných ploch, dle rovnice 1.18.



Na příkladu korozních reakcí je možné vidět, že obsah kyslíku ve vodě má v některých případech i funkci pasivační, způsobující tvorbu ochranné vrstvy kovu. Vliv kyslíku v soustavě proto nemusí být jednoznačný. Možnost vzniku pasivační vrstvy a její funkce určuje, že na základě řady ušlechtilosti kovu nelze předpovídat jejich korozní odolnost.

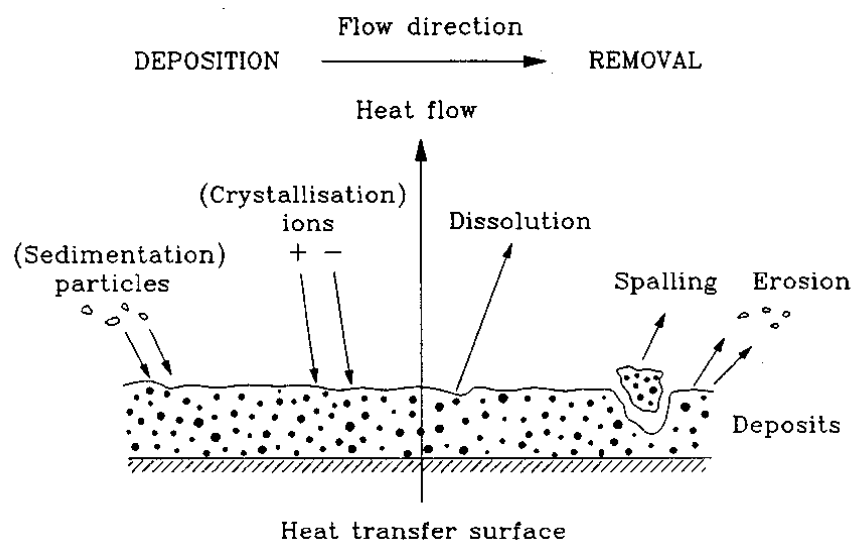
Když budou anody a katody na povrchu statisticky rovnoměrně rozmístěné, vzniká rovnoměrná koroze, jejíž rychlost s obsahem rozpuštěného kyslíku ve vodě vzrůstá. Rovnoměrný charakter koroze má často korozní působení rozpuštěného CO_2 . Ovšem pokud jsou anody a katody rozmístěny nerovnoměrně, například pasivační ochranná vrstva je na několika místech z nějakého důvodu přerušena (např. hrubý povrch sváru, inkrust kotelního kamene, mikrobiální nános), může zde docházet k lokální důlkové korozi s velkou proudovou hustotou a rychlým průběhem. K tvorbě lokální koroze přispívají vysoké koncentrace vodíkového iontu, tedy nízké pH, a takzvané stimulanty koroze. Stimulanty koroze mohou být zejména ionty chlóru a síry, které rozrušují pasivační vrstvu a lokálně tak odhalují nechráněný povrch kovu.

3.3 Fyzikální faktory ovlivňující riziko koroze a tvorby úsad

V předešlých kapitolách byl zmíněn vliv chemie vody na tvorbu různých typů úsad. Chemie vody má skutečně zásadní podíl na jejich tvorbu, je ovšem nutné v této souvislosti zmínit také vliv fyzikálních faktorů. K této problematice existuje celá řada studií značící velký význam takzvaného faktoru zanášení v širokém spektru průmyslových aplikací. V literatuře se tato veličina nejčastěji označuje jako odpor R_f (fouling factor). R_f je složená hodnota z R_{fi} (na vnitřním) a R_{fe} (na vnějším) povrchu výměníku. Vyjadřuje se jako tepelný odpor zanesením v $[m^2 \cdot k \cdot W^{-1}]$, případně jako rezerva plochy přestupu tepla v [%]. Při návrhu výměníku se s hodnotou R_f dle typu použití výměníku běžně uvažuje.

Stejně jako v kapitole chemie je třeba zmínit, že pro rozsáhlost dané problematiky a s ohledem na předmět práce je zde zmíněno pouze nutné minimum pro pochopení souvislostí a ucelenost práce. Podrobnější informace lze nalézt v odborné literatuře například Bott (1995).

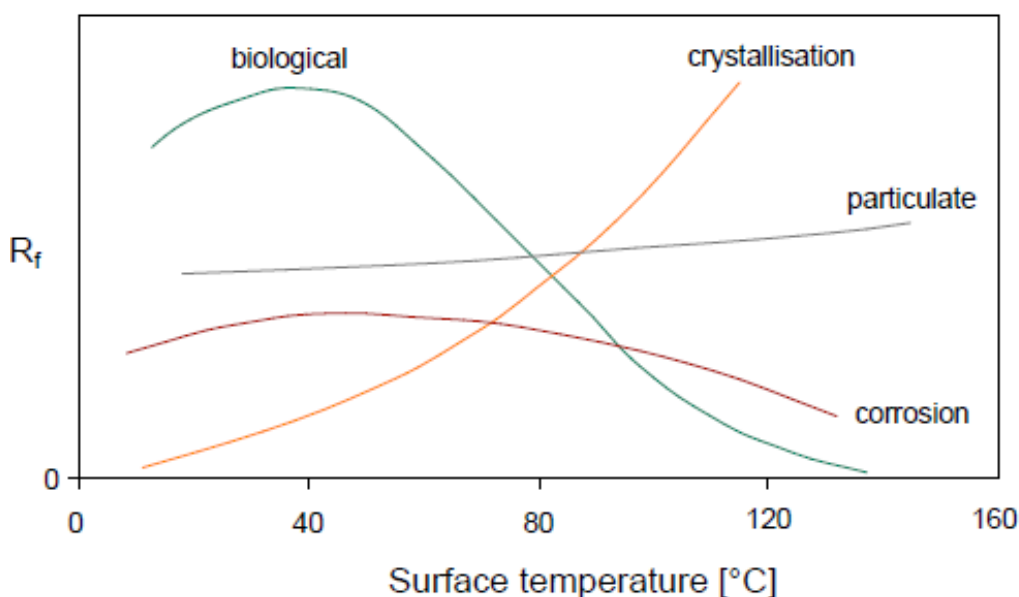
Na průběh tvorby usazenin v otopných soustavách mají kromě chemických vlastností vody, které byly předmětem předcházejících kapitol, významný vliv fyzikální faktory. Tvorba úsad se může významně lišit v závislosti na materiálových a mechanických parametrech teplosměnných ploch, fyzikálních parametrech prostředí a hydraulických charakteristikách proudění. Právě úvod do této problematiky bude předmětem dalších kapitol. Na obrázku 1.09 je naznačen obecný princip postupu ukládání a odplavování usazenin na stěně teplosměnné plochy.



Obr. 1.09 Princip postupu ukládání a odplavování (Kazi, 2012)

3.3.1 Hustota tepelného toku

Pro tvorbu úsad je zásadní teplota povrchu teplosměnné plochy. V případě minerálních úsad (kotelního kamene) riziko tvorby narůstá se zvyšující se teplotou. Naopak riziko biologických úsad se se zvyšující teplotou snižuje. Reálně bývají úsady často kombinací více činitelů. Graf na obrázku 1.10 představuje souvislost rizika R_f (faktoru zanášení) a teploty stěny teplosměnné plochy pro různé typy úsad.



Obr. 1.10 Vliv teploty povrchu na zanášení (10)

3.3.2 Drsnost povrchu teplosměnných ploch

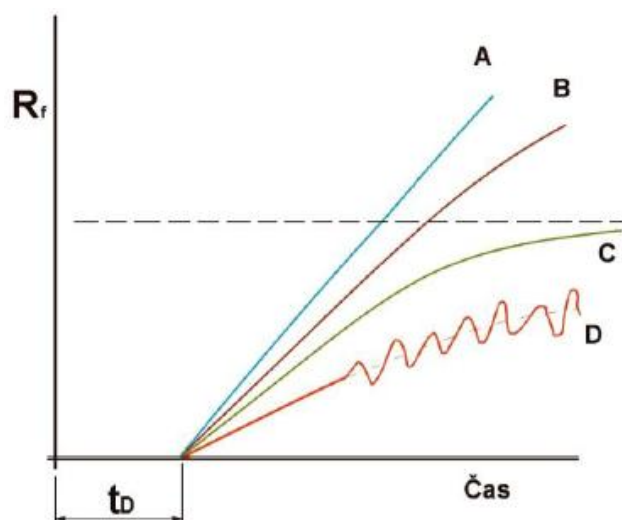
Vyšší drsnost ploch usnadňuje zachytávání úsad a kalů a zároveň také usnadňuje vznik lokálních korozní článků. V otopných soustavách se potrubí a teplosměnné plochy obecně uvažují jako hydraulicky a drsné s turbulentním charakterem proudění. Dnes v otopných soustavách velmi často používané materiály, jako měď, nerez, vícevrstvé kompozity a plasty, se blíží charakteristice hydraulicky hladkých ploch. Tento stav však trvá pouze velmi krátce a změny drsnosti mohou být velmi značné, což je zřejmé z tabulky 1.07

Tab. 1.07 Absolutní drsnost povrchů vybraných materiálů

Materiál	Δ nové [mm]	Δ po použití [mm]	Δ po delší době [mm]
ocelové bezešvé potrubí	0,01–0,02	0,15	0,3
plastové PE potrubí	0,001–0,003	–	0,01–0,015

Zdroj: Havlík et Pícek (2015)

Různé druhy úsad generují odlišnou drsnost a zároveň mají odlišnou pevnost. Tyto skutečnosti mají zásadní vliv na různý průběh zanášení. Na obrázku 1.11 je znázorněn vývoj různých forem úsad. Lineární průběh A značí tvrdé úsady, klesající tendence B značí stav, kdy nefunguje oddělování částí úsad, ale zvětšují se smykové síly zpomalující jejich další nárůst. Křivka C značí od určité tloušťky asymptotický průběh, kdy příbytek nových nánosů je vyvážen jejich odplavováním a vrstva se dále nezvětšuje. Tento typ byl nejčastěji zaznamenaným průběhem tvorby úsad (Kazi, 2012).



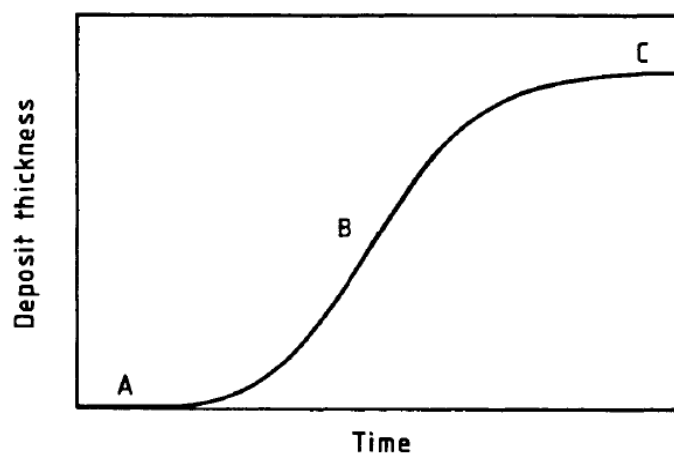
Legenda:

- A – tvrdé úsady, lineární nárůst
- B – klesající tendence více typů úsad vlivem smykových sil
- C – měkké nánosy
- D – nepravidelný průběh vlivem proměnlivých podmínek

Obr. 1.11 Průběh tvorby úsad (Vosmík, 2014a)

Křivka D pak ukazuje na nepravidelný postup ukládání při proměnlivých podmínkách. t_D značí čas před začátkem ukládání úsad, během kterého probíhají vzájemné interakce mezi teplotou kapalinou a teplosměnnými plochami, formují se zárodky krystalů apod.

Dle Kaziho (2012) lze nejčastější průběh reprezentovaný křivkou C v grafu 1.11 v čase rozdělit do tří fází, viz graf na obrázku 1.12. Ve fázi A (na obrázku 1.11 označená jako t_D) začíná proces zanášení stabilizací. Délka této fáze významně záleží na prostředí, může trvat od několika sekund až po několik týdnů. Ve fázi B narůstá úsada, což je proces neustálého ukládání a odnášení částic až do chvíle, kdy smykové napětí na povrchu vrstvy už neumožní další nárůst tloušťky. Ve fázi C je nárůst síly vrstvy pouze asymptotický nebo již má nános zcela konstantní tloušťku.



Obr. 1.12 Fáze tvorby úsady v čase (Bott, 1995)

3.3.3 Rychlost proudění

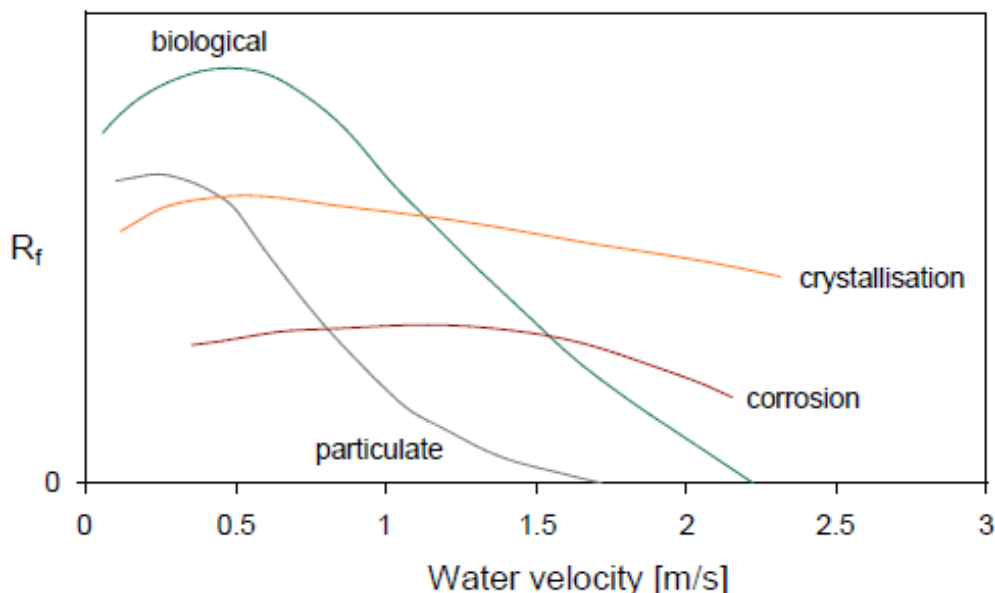
Rychlost proudění, stejně jako drsnost má vliv na průběh usazování. Velikosti smykových sil v mezní vrstvě mezi teplonosnou kapalinou a teplosměnnou plochou jsou úměrné rychlosti proudění. Při vyšších rychlostech proudění jsou smykové síly větší a možnost tvorby usazenin je tak redukována. Rychlost proudění má samozřejmě zásadní vliv na tlakové ztráty, charakter proudění, výkon oběhových čerpadel a další. Při návrhu a dimenzování otopné soustavy, ať už se vychází přímo z jakékoli metody (optimálních rychlostí, ekonomické tlakové ztráty, ekvivalentních délek potrubí atd.), musí být zohledněny rychlostní meze proudění v potrubí zejména z důvodů rizika korozní eroze, v prostředí s pobytem osob také z hlediska komfortu (omezení zvukových projevů proudění). Empiricky jsou například pro metodu ekonomické tlakové ztráty v obytných budovách doporučeny rychlosti proudění takto:

- přípojky k tělesům, vertikální rozvody 0,3–0,7 m/s
- horizontální rozvody v nebytových prostorech 0,8–1,5 m/s

Dodržením výše uvedených rychlostí se v návrhu předchází rizikům zvukových projevů. Z hlediska rizika korozní eroze, což se týká především průmyslových aplikací nebo právě proudění ve výměníku, je zásadní dodržení maximálních rychlostí W_{max} , které jsou závislé na materiálu potrubí. V literatuře se běžně uvádí tyto hodnoty:

- ocel 4,5 m/s
- měď 2 m/s
- mosaz 1,5–2,5 m/s

Pokusy bylo zjištěno, že při proudění rychlostí vyšší než 2,3 m/s se již rychlost tvorby úsad nemění. Proto je jako optimální z hlediska tvorby úsad uvažováno rozmezí 1,5–2,3 m/s. Jak je vidět z grafu na obrázku 1.13, v této oblasti je eliminován vliv biologických úsad a usazování volných částic na minimum. Téměř konstantně pokračuje pouze působení minerálních korozivních činitelů tvorby úsad.



Obr. 1.13 Vliv rychlosti proudění na zanášení (11)

Z logiky funkce otopných systémů je zřejmé, že rychlosti v potrubích a trubkových výměnících zdrojů jsou několikanásobně vyšší než v otopných tělesech, proto jsou volné úsady a korozivní produkty sedimentovány v těchto částech soustavy. Tedy v případě, že se do otopných těles dostanou a nejsou zachyceny na jejich ventilech. Naproti tomu ve výměnících vlivem vysoké teploty stěn dochází především k nárůstu pevných úsad, které proudění neodplaví.

3.4 Legislativní požadavky ve vztahu k problematice

Základní norma týkající se teplovodních soustav vytápění je evropská harmonizovaná norma ČSN EN 12 828 + A1 Tepelné soustavy v budovách – Navrhování teplovodních otopných soustav, v aktuálním znění z listopadu 2014. Norma definuje obecný požadavek na soustavy takto: „Tepelná soustava musí být navržena, smontována a provozována tak, aby nezpůsobovala na budově nebo ostatních zařízeních škody, a s ohledem na minimalizaci spotřeby energie.“ (ČSN EN 12 828, str. 17). Z tohoto záhy vyplývá požadavek se již v návrhové fázi zabývat kvalitou topné vody, neboť i to může mít zásadní vliv na bezporuchový provoz účinnost systému, což bylo rozebráno v předešlých kapitolách. „Složení vody použité v otopné soustavě musí být takové, že zachová správnou funkčnost součástí soustavy tak, aby byl garantován

bezpečný a ekonomický provoz“ (ČSN EN 12 828, str. 18). Národní poznámkou je zmíněno, že kvalita vody pro otopné soustavy má odpovídat požadavkům ČSN 07 7401 Voda a pára pro tepelná energetická zařízení s pracovním tlakem do 8 MPa. Předmětem této normy z roku 1992 jsou kromě jiného teplovodní otopné soustavy s výkonem nad 60 kW. Požadavky na plnicí a topnou vodu těchto otopných soustav vyjadřuje tabulka 1.08.

Tab. 1.08 Požadavky na plnicí a otopnou vodu

Voda plnicí a doplňovací	Tvrdost	1	mmol/l
	Ca ²⁺	0,3	mmol/l
	Koncentrace celkového Fe + Mn	0,5	mg/l
Otopná voda	Hodnota pH při 25°C	8,5	
	Zjevná alkalinita	0,5–1,5	mmol/l
	Přebytek Na ₂ SO ₃	10–40	mg/l
	Přebytek P ₂ O ₂	5–15	mg/l
*koncentrace chemických ekvivalentů ** – doporučuje se 2× (p-hodnota) < (m-hodnota) *** – za přítomnosti mědi nemá být pH vyšší než 10			

Zdroj: ČSN 07 7401

Zpracoval: autor

Z rozdělení tabulky je patrné, že u plnicí a doplňovací vody je nutné sledovat především tvrdost a obsah rozpuštěných látek, neboť tyto po krátké době reagují a tvoří minerální úsady. Během několika týdnů provozu se parametry topné vody stabilizují. Pro topnou vodu jsou pak zásadní parametry z hlediska koroze, zejména pH, KNK_{4,5} a obsah kyslíku.

ČSN EN 12 828 se pro více informací o požadavcích na kvalitu vody odkazuje na německou VDI 2035. Norma VDI 2035 má tři části. V první část (VDI 2035-1) se zabývá tvorbou usazenin, druhá část (VDI 2035-2) řeší problematiku koroze ze strany vody a třetí část (VDI-2035-3) je věnována korozi ze strany spalin.

V části VDI 2035-1 umožňuje hodnotit rizika poškození kotelním kamenem dvěma způsoby. První empirický způsob hodnocení na základě tvrdosti vody vychází z praktických zkušeností. Druhý způsob na základě výpočtu maximálního vysrážitelného množství kovů alkalických zemin je přesnější, ale pro jeho použití je nutná znalost výsledků analýzy vody.

EMPIRICKÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ

Tento způsob je reprezentován tabulkou 1.09, určující požadavky na napouštěcí a doplňovací vodu podle celkového výkonu systému. Tabulka platí pro systémy, kde se předpokládá celková vyměněna vody za dobu životnosti menší než trojnásobek objemu soustavy.

Význam rizika vzniku kotelního kamene roste s celkovým množstvím rozpuštěných látek, což je součin jejich koncentrace a množství vody v soustavě. Riziko se zvyšuje také s nárůstem hustoty

tepelného toku zdroje, neboť vznik kamene je ovlivněn mimo jiné teplotou povrchu teplosměnné plochy na styku s vodou, hustota tepelného toku a plocha teplosměnné plochy přitom určují výkon zdroje. Tyto skutečnosti jsou v tab. 1.09 zohledněny způsobem popsáním v dalším odstavci.

Tab. 1.09 Empirický způsob hodnocení rizika kotelního kamene dle VDI

Celkový tepelný výkon [kW]	Tvrdost (obsah Ca+Mg) [mmol/l]	Tvrdost (obsah Ca+Mg) [°d]
≤50	bez požadavků	bez požadavků
>50 – ≤ 200	≤ 2,0	≤ 11,2
>200 – ≤ 600	≤ 1,5	≤ 8,4
>600	< 0,02	< 0,11

Zdroj: VDI 2035-1

Zpracoval: autor

Pakliže poměr množství vody v systému a výkonu zdroje je vyšší než 20 l/kW, uvažuje se v tabulce 1.08 posun o jednu výkonovou kategorii. To v důsledku znamená, že pokud je instalován zdroj o výkonu 25 kW do soustavy s objemem vyšším než 500 l (například soustava s akumulací nádrží), je třeba posuzovat požadavky na kvalitu vody podle 2. řádku tabulky 1.08. Pakliže je poměr výkonu a vodního objemu soustavy vyšší než 50 l/kW, měla by být voda upravena na hodnotu < 0,02 mmol/l.

U soustav s recirkulačními zdroji o výkonu < 50 kW, což jsou dle normy VDI 2035-1 zdroje s poměrem výkonu a vodního objemu menším než 0,3 l/kW (typicky plynové závěsné kotle nebo el. kotle), je při tvrdosti vody vyšší než 3 mmol/l nutné uplatnit další opatření.

VÝPOČTOVÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ

Tento způsob hodnocení je možný na základě znalosti koncentrace vápníku a kyselinové neutralizační kapacity $KNK_{4,5}$ a je reprezentován tabulkou 1.10. Zjišťuje se celková koncentrace vápníku ve vodě $m(CaCO_3)$ a přechodná tvrdost $m(MCO_3)$, kterou lze vyjádřit z $KNK_{4,5}$. Jestliže nižší z obou hodnot odpovídá požadavkům tabulky 1.10, je míra rizika úsad přijatelná.

Podrobný způsob posouzení je možné zjednodušit a provést posouzení bez podrobné analýzy vody pouze na základě celkové tvrdosti nebo solnosti vody. Vyjádření solnosti (sumy alkalických zemin, viz kapitola 3.2.4). Tento postup může být zbytečně přísný, neboť uvažuje, že veškerá tvrdost je způsobena vápníkem, tzn. tvrdost celková = přechodná tvrdost = solnost.

Tab. 1.10 Výpočtový způsob hodnocení rizika kotelního kamene dle VDI

Celkový tepelný výkon [kW]	$m(\text{CaCO}_3)$ [g/m^3]
recirkulační a elektrické topné zdroje (1)	≤ 300
≤ 50	bez požadavků
$>50 - \leq 200$	≤ 200
$>200 - \leq 600$	≤ 150
>600	≤ 2

*) dle VDI 2035 je recirkulačním zdroj s poměrem výkonu a vodního objemu menším než 0,3 l/kW.
Pozn. typicky závěsné plynové kotle, el. přímotopné kotle.

Zdroj: VDI 2035-1

Zpracoval: autor

Posouzení dle tab. 1.10 vychází z výpočtu molární hmotnosti látek uvedeného v tabulce 1.11. Maximální vysrážitelné množství se určí z rovnic 1.19–1.21, koncentrace je nutné dosadit v mmol/l.

Tab. 1.11 Vyjádření váhového ekvivalentu jednotek látkového množství pro některé látky

	Ca^{2+}	2HCO_3^-	CaCO_3	CO_2	H_2O
mol/ m^3	1	2	1	1	1
g/mol	40	61	100	44	18

Zdroj: VDI 2035-1

Zpracoval: autor

Podrobný výpočtový způsob (uvažuje se menší z hodnot):

$$m(\text{CaCO}_3) = 100 \cdot \text{Ca}^+ \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad \{1.19\} \quad (\text{VDI 2035-1})$$

$$m(\text{MCO}_3) = 50 \cdot \text{KNK}_{4,5} \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad \{1.20\} \quad (\text{VDI 2035-1})$$

Zjednodušený způsob výpočtu:

$$m(\text{MCO}_3) = 100 \cdot \text{tvrdost} (\text{Ca}^+ + \text{Mg}^+) \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad \{1.21\} \quad (\text{VDI 2035-1})$$

Zjednodušený způsob může být u vody s vysokou stálou tvrdostí (sulfidy, chloridy, fosforečnany) zbytečně přísný. Absencí analýzy vody nám na druhé straně zůstávají skryté parametry vody významné pro riziko koroze.

Zatímco pro tvorbu minerálních úsad jsou zásadní parametry napouštěcí a doplňovací vody, koroze systému je závislá na parametrech provozní topné vody. V případě užívání vody z vodovodního řadu jako napouštěcí vody (v obvyklé kvalitě) nemá kvalita plnicí vody na parametry topné vody z hlediska koroze zásadní vliv. Zásadní vliv naopak mají parametry a děje probíhající v soustavě, např. materiál soustavy, dotace kyslíku, činnost mikroorganismů atd.

Norma VDI 2035-2 uvádí, pakliže budou dodrženy parametry topné vody (viz tabulka 1.12), je pravděpodobnost koroze minimální. Parametry topné vody by se měly ověřovat 8–12 týdnů po uvedení do provozu, zejména pokud bylo pH plnicí vody výrazně nižší než 8,2. Jestliže bude i po

12 týdnech pH nižší než 8,2 mělo by se v případě soustavy z oceli či mědi přistoupit k úpravě parametrů vody.

Tab. 1.12 Bezpečné parametry oběhové vody z hlediska koroze

Elektrická vodivost při 25°C	μS/cm	< 100	1000–1500
Vzhled		bez sedimentů	bez sedimentů
pH při 25 °C		materiál soustavy měď a ocel 8,2–10 pH	
		materiál soustavy hliník 6,5–8,5 pH	
Obsah kyslíku ve vodě	mg/l	< 0,1	< 0,02

Zdroj: VDI 2035-2

Zpracoval: autor

3.5 Výpočet účinnosti zdrojů tepla

Ke stanovení účinnosti zdroje tepla lze přistupovat dvěma metodami:

- a) Metoda přímá (direct): Tato metoda porovnává množství energie (tepla) přivedeného do zdroje s množstvím tepla na jeho výstupu. Energií na vstupu do kotle je myšlena zejména výhřevnost paliva, v přesné interpretaci je to součet veškerého tepla, tedy také citelného a vázaného tepla spalovacího vzduchu i plynu, které ale je vzhledem k výhřevnosti paliva minoritní a obvykle se zanedbává. Základní vzorec lze vyjádřit takto:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100 [\%] \quad \{1.22\} \quad (\text{Horák, 2014})$$

- b) Metoda nepřímá (losses): Princip této metody se odvíjí od úvahy, že zdroj je ideální stroj, v tomto případě tedy plynový kotel má účinnost rovno 1, tedy 100 %. Odečtením jednotlivých ztrát od této hodnoty je poté zjištěna účinnost reálného zkoušeného kotle. V případě plynového kotle je zásadní stanovit ztráty:

- Z_{co} – ztráta způsobená únikem hořlavin ve spalínách [%]
- Z_k – ztráta způsobená únikem tepla ve spalínách [%]
- Z_{sv} – ztráta způsobená odevzdáním tepla do okolí [%]

Základní vzorec lze tedy vyjádřit následovně:

$$\eta = 100 - \sum(Z_{co} + Z_k + Z_{sv}) [\%] \quad \{1.23\} \quad (\text{Horák, 2014})$$

Při stanovení účinnosti plynových kotlů dle norem ČSN EN 297, 625, 677 a 15502-2-1 se postupuje metodou přímou. Zkušební postup všech zmíněných norem je principiálně stejný, ovšem liší se stavy, při kterých se účinnost zjišťuje v závislosti na tom, o jaký typ kotle se jedná (kondenzační, typ C, B₁₁, B₂, B₅, kombi – pro přípravu TV).

Nevýhoda přímé oproti nepřímé metodě měření je zřejmá. Při přímé metodě jsme s relativně velkou přesností (v normách ČSN EN 297, 625, 677 a 15502-2-1 se udává se nejistota měření ± 2 %) schopni určit účinnost zdroje. Nicméně nejsme schopni určit, jaký vliv mají na účinnost jednotlivé složky ztrát. Tato nevýhoda je kompenzována přímočarým a do jisté míry jednodušším postupem, který si klade méně požadavků na měření.

V další části práce se bude využito přímé metody podle harmonizované evropské normy ČSN EN 15502-1+ A1 – Kotle na plynná paliva pro ústřední vytápění. Tato norma z ledna 2016 bude do budoucna pravděpodobně stěžejní, neboť jsou v ní implementovány požadavky nařízení evropské komise č. 813/2013, kladoucí zvýšené nároky na účinnost plynových kotlů.

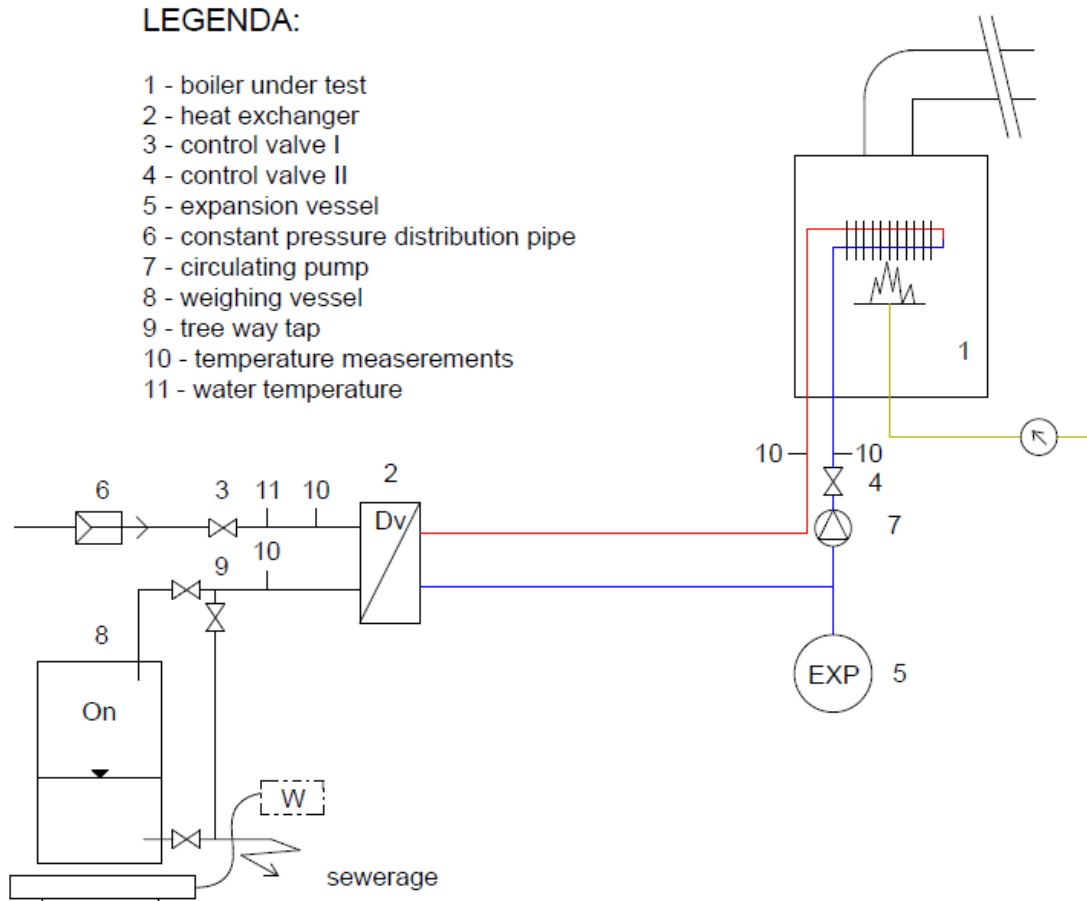
Měření účinnosti zdroje přímou metodou vychází ze zkušebního topného okruhu, ve kterém je kromě zdroje také výměník, sběrná nádoba na váze, oběhové čerpadlo a regulační prvky (viz obrázek 1.14.) Zkoušený zdroj ohřívá topnou vodu primárního okruhu, ta pomocí oběhového čerpadla cirkuluje primárním okruhem od zdroje, kde je ohřívána, k výměníku, v němž teplo odevzdává do vody na sekundárního okruhu. Výměník tak hydraulicky odděluje primární a sekundární stranu soustavy. Do výměníku je na primární straně napojeno výstupní a vstupní potrubí z kotle. Na sekundární straně do výměníku vstupuje studená voda například z vodovodního řadu, ohřátá výstupní voda je poté svedena do sběrné nádoby umístěné na váze. Množství tepla je dáno součinem hmotnosti vody a jejího teplotního rozdílu.

$$\eta_u = \frac{4,186 \cdot m \cdot (t_2 - t_1) + D_p}{10^3 \cdot V_g \cdot H_i} [\%] \quad \{1.24\} \quad (\text{ČSN EN 15502-2-1+A1})$$

- η_u – tepelná účinnost [%]
- m – hmotnost vody [kg]
- $(t_2 - t_1)$ – rozdíl teplot na výstup – vstup na sekundární straně [%]
- D_p – tepelná ztráta způsobená zkušebního okruhu [kJ]
- V_g – spotřeba plynu [m^3]
- H_i – výhřevnost zkušebního plynu [KJ]

LEGENDA:

- 1 - boiler under test
- 2 - heat exchanger
- 3 - control valve I
- 4 - control valve II
- 5 - expansion vessel
- 6 - constant pressure distribution pipe
- 7 - circulating pump
- 8 - weighing vessel
- 9 - tree way tap
- 10 - temperature measurements
- 11 - water temperature



Obr. 1.14 Testovací okruh s výměníkem tepla (ČSN EN 15502-2-1+A1) Zpracoval: autor

Pro kondenzační kotle do 400 kW s modulací výkonu se stanovuje tepelná účinnost výpočtem, který zahrnuje poměrově účinnost při střední hodnotě výkonu a dále účinnost při výkonu sníženém, což má být 30 % střední hodnoty.

Před samotnou zkouškou se musí primární okruh teplotně stabilizovat tak, aby vstupní teplota zpět do kotle měla konstantní teplotu $30 \pm 0,5$ °C. Ve chvíli, kdy je tohoto stavu dosaženo, může být zahájeno měření. To znamená, že výstupní voda z výměníku na sekundární straně proudí do sběrné nádoby na váze a přitom se zaznamenává její teplota. Během zkoušky by se neměl změnit průtok o více než 1 %. Cyklus zkoušky trvá 10 minut, ale pro stanovení účinnosti jsou třeba nejméně tři zkušební cykly. Což je podmíněno tím, že se žádná z vypočtených účinností dle vzorce (1.24) u jednotlivých cyklů nesmí lišit o více než 0,5 %. V takovém případě je možné jejich průměr považovat za výsledek. Při stanovení účinnosti při sníženém výkonu je povolena odchylka 1 %.

3.6 Výzkumný problém

- Jakým způsobem ovlivňují biologické, chemické a fyzikální faktory zanášení teplovodních otopných soustav?
- Jakými prostředky lze těmto negativním jevům předcházet?
- Jaký je potenciál čištění teplovodních soustav?

3.7 Metodika práce

V teoretické části práce byla popsána problematika zanášení otopných soustav zejména analýzou shromážděných materiálů. Na základě této analýzy knih, studií, norem, článků z odborné literatury i webových zdrojů byla provedena komparace přístupů řešení výzkumné otázky. Zásadní informace byly následně ve formě opatření pro ochranu teplovodních otopných soustav budov s ústředním zdrojem tepla implementovány v aplikační části práce. V aplikační části bude kromě toho použita také metoda modelování a komparace chování teplosměnných ploch ve stavu bez úsad a s úsady. Praktickým experimentem, metodou pozorování a měření bude dále stanoven vliv usazenin na účinnost zdroje tepla. Z korelace modelového stavu a praktického experimentu je snahou indukovat obecné závěry pro vliv usazenin na účinnost otopné soustavy.

V souladu s odstavci výše o užitých metodách lze aplikační část rozdělit do tří částí. V první části je popsán experiment stanovení vlivu úsad na účinnost zdroje (plynového kondenzačního kotle). V druhé části je popis důsledků zanášení systému včetně modelace vlivu úsad na součinitel přestup tepla teplosměnných ploch. V poslední části je poté souhrn praktických informací pro předcházení znečištění, úprava parametrů topné vody a čištění otopných soustav.

Praktický experiment bude metodou měření a pozorování ověřovat vliv chemického čištění výměníku na změnu účinnosti zdroje. Stručný popis experimentu lze shrnout do těchto bodů:

- a) orientační stanovení účinnosti plynového kondenzačního kotle po cca 15 letech provozu metodou přibližně vycházející z normy pro stanovení účinnosti ČSN EN 15502-1 + A1
- b) chemické vyčištění topného okruhu zdroje
- c) orientační stanovení účinnosti vyčištěného plynového kondenzačního kotle po cca 15 letech provozu metodou přibližně vycházející z normy pro stanovení účinnosti ČSN EN 15502-1 + A1
- d) stanovení rozdílů účinností a hydraulického odporu výměníku

Měřicí přístroje a pomůcky:

Analyzátor spalin Testo 330 – 2

Teploměr – vlhkoměr Comet C3631

Kalibrovaná váha do 200 kg Oiml XK3190-A12E

Zkušební okruh Protherm s čidly a měřícím zařízením

Měřič diferenčního tlaku TA Hydronics

Pro výpočty bude použit software Microsoft Excel

4 Aplikační část a experimentální část

Záměrem aplikační části je provést experiment stanovení rozdílu účinnosti zdroje (plynového kondenzačního kotle) před a po chemickém vyčištění. Vyjádřit vliv úsad na funkci otopné soustavy, popsat opatření vedoucí k předcházení a řešení problémů jejich výskytu včetně základních způsobů úpravy vody pro teplovodní systémy vytápění.

4.1 Experiment, stanovení potenciálu zvýšení účinnosti zdroje

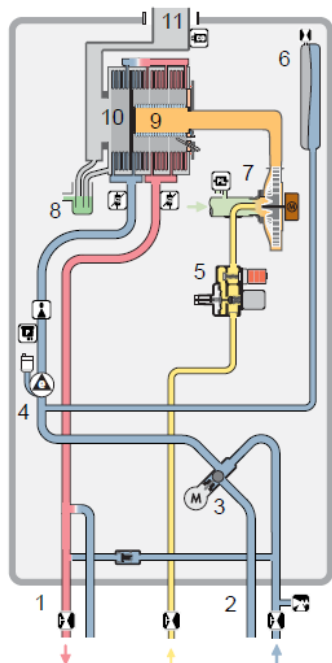
Smyslem experimentu je určit vliv usazenin na stěnách výměníku ze strany topné vody na účinnost zdroje při různých teplotních spádech okruhu. Principem je měření účinnosti a hydraulického odporu staršího plynového kotle, jeho následné chemické vyčištění a opakování měření účinnosti ve vyčištěném stavu.

Pro experiment stanovením účinnosti byl vybrán závěsný plynový kondenzační kotel Vaillant UV INT 196/2-7-H, rok výroby 2000. Tento kotel byl přibližně 15 let provozován v objektu okresu Brno, kde je obecně tvrdá voda. Z informací montážní firmy, která kotel po cca. 15 letech provozu demontovala a nahradila novým, vyplývalo, že kotel se při provozu přehříval. Bylo zde tedy důvodné podezření na zanesení výměníku. Po převozu do laboratoře firmy Vaillant v Chrášťanech u Prahy byl kotel instalován do zkušebního měřeného okruhu, viz obr. 1.16. Při instalaci a spouštění kotle byla zjištěna další možná příčina přehřívání, a to zanesení výměníku na straně spalin. Protože účelem výzkumu bylo stanovení vlivu inkrustace pouze ze strany topné vody, byl kotel ze strany spalin vyčištěn a připraven na testovací provoz.

Zkouška byla inspirována metodikou dle normy pro zkoušení plynových kotlů ČSN EN 15 502-1 + A1. Nemohly být dodrženy všechny podmínky, ať už s ohledem na smysl zkoušky, vybavení laboratoře nebo z důvodu časové kapacity. Účelem zkoušky rovněž nebylo stanovit účinnost plynového kotle dle výše uvedené normy, ale vyjádřit rozdíl účinnosti před a po vyčištění výměníku kotle, zmiňovaná norma tak byla pouze vodítkem.

4.1.1 Popis zdroje a systému

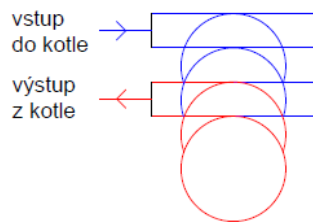
Zkoušeným zdrojem byl závěsný plynový kondenzační kotel s přetlakovým modulačním hořákem Vaillant UV INT 196/2-7-H, viz schéma na obr. 1.15. Rozsah výkonu kotle 9–20 kW, čerpadlo zdroje dvourychlostní, spalovací komora uzavřená, výměník zdroje trubkový, složený ze 4 smyčkových okruhů z nerezové oceli.



LEGENDA:

- 1 - výstup z kotle
- 2 - vstup do kotle
- 3 - trojcestný ventil
- 4 - oběhové čerpadlo
- 5 - plynová armatura
- 6 - expanzní nádoba
- 7 - ventilátor
- 8 - odvod kondenzátu
- 9 - hořák
- 10 - kondenzační výměník
- 11 - odvod spalin

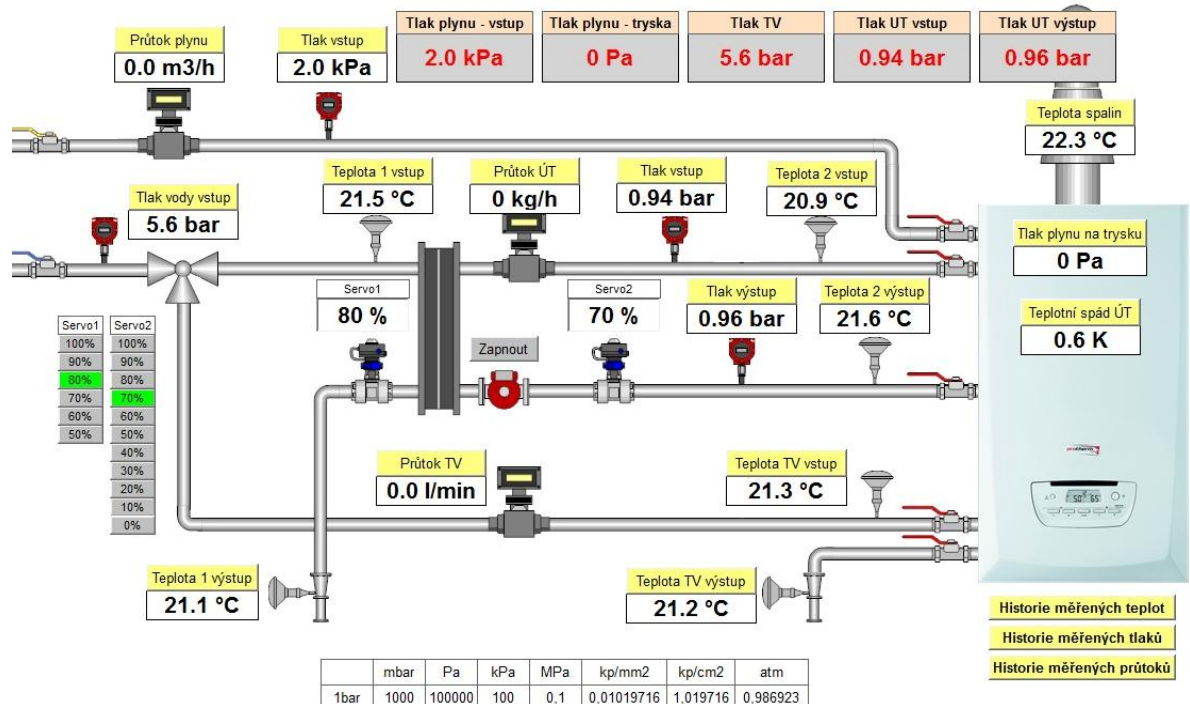
SCHÉMA VÝMĚNÍK:



Zadní dvě smyčky (přívod do kotle) a přední dvě smyčky (výstup z kotle) jsou spojeny paralelně. Zadní dvojice je poté sériově napojena na přední dvojici smyček, jak je naznačeno na schématu. Toto řešení výměníku snižuje hydraulický odpor při zachování velké teplosměnné plochy.

Obr. 1.15 Schéma zdroje Vaillant UV INT 196/2-7-H (12)

Zkušební okruh byl složen z chladicího deskového výměníku, oběhového čerpadla s proměnnými otáčkami, dvou regulačních ventilů opatřených servopohony a řadou čidel zaznamenávajících parametry tlaku, teploty a průtoku na primární i sekundární straně okruhu. Dále byla měřena teplota spalin a průtok plynu, jak je vidět na obrázku 1.16.



Obr. 1.16 Grafické znázornění zkušební okruhu v měřicím softwaru počítače (autor)

Všechny změřené hodnoty byly v reálném čase přenášeny a ukládány do počítače, kde se vytvářely grafy průběhu teplot. Příklad grafického výstupu z měření je umístěn v příloze č. 1. Celý systém bylo možné z počítače rovněž ovládat.

4.1.2 Metodika a postup zkoušení

Metodika stanovení účinnosti vychází z ČSN EN 15502-1 + A1, která je podrobněji popsána v kap. 3.5. Při provádění tohoto experimentu byla použita řada zjednodušení, jejichž důsledkem není možné uvažovat výslednou účinnost jako relevantní hodnotu pro zkoušený typ kotle, neboť některé podmínky zkoušky dle normy nebylo možné dodržet, zejména:

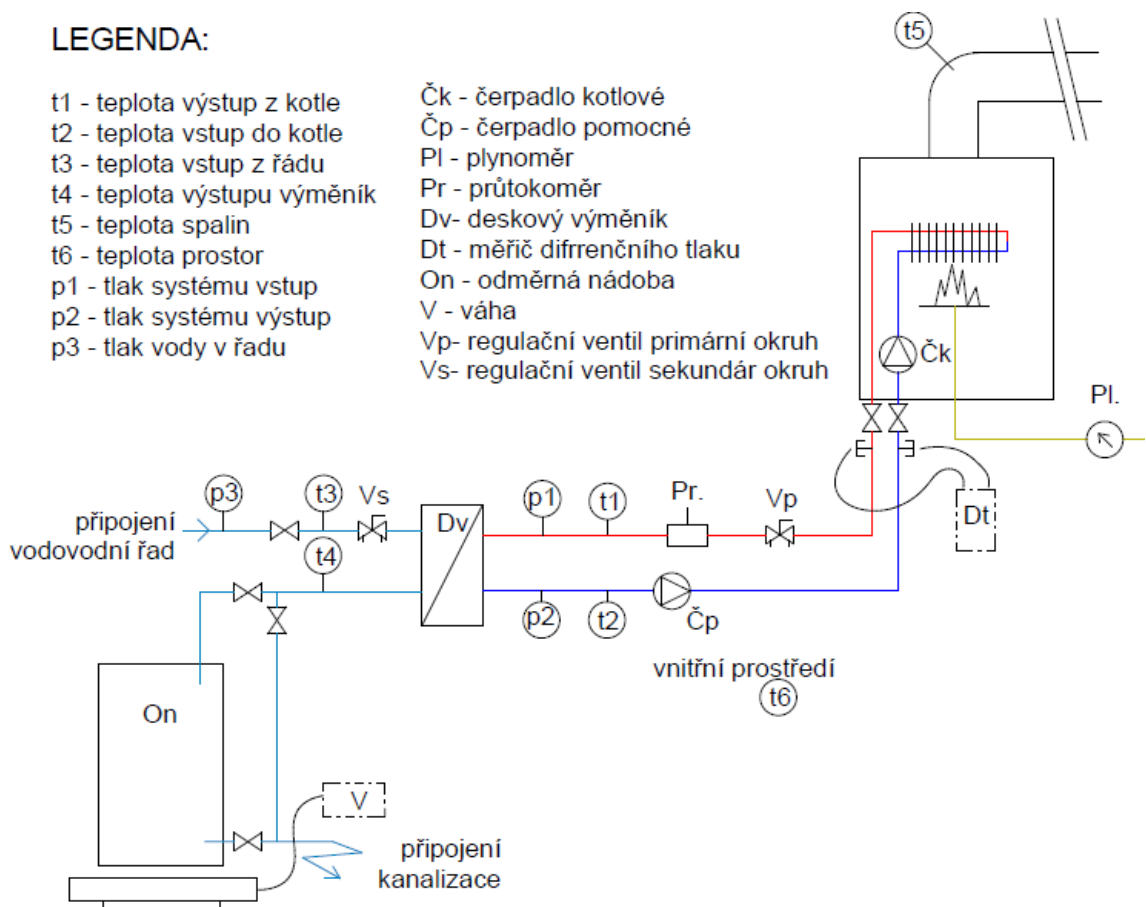
- Účinnost se v případě plynových kotlů s modulací výkonu má stanovit jako průměr při dvou výkonech. Prvním by byla střední hodnota výkonu mezi minimem a maximem, druhým by byl výkon 30 % z předešlé hodnoty.
Při tomto experimentu byla účinnost měřena jen při střední hodnotě výkonu.
- Měření účinnosti použitého typu zdroje by mělo probíhat při teplotě topné vratné vody ($30^{\circ}\text{C} \pm 0,5$). Při tomto experimentu bylo měření prováděno v kroku po 5°C při teplotách vratné vody ($30\text{--}50^{\circ}\text{C} \pm 1,5$).
- Dle normy má měřicí cyklus probíhat 10 minut opakovaně minimálně 3-krát, pokud rozdíl výsledků je do 0,5 %. V tomto experimentu byly měřicí cykly provedeny pouze jednou, kromě zkoušek pro odhad přesnosti měření.
- Kotel se nenacházel v laboratorním prostředí. Vnitřní prostředí během zkoušky bylo $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $30 \pm 5\%$ RH.
- Palivem nebyl zkušební plyn, ale zemní plyn z veřejné přípojky. Výhřevnost byla stanovena výpočtem v příloze č. 6 z obvyklých hodnot Tranzitního zemního plynu.
- Tepelná ztráta okruhu samotného okruhu byla odvozena z rychlosti poklesu teploty v rozporu s normou, kde je instalován přídavný zdroj tepla o známém výkonu.

Zmíněné odchylky od norem nejsou v tomto případě limitujícím faktorem, neboť v experimentu nejde o prokázání konkrétní účinnosti kotle, ale o porovnání účinnosti stejného kotle ve stejném prostředí pouze s nevyčištěným/vyčištěným výměníkem. Je nutné upozornit na zdánlivý nesoulad obvykle uvažovaných hodnot účinnosti plynových kondenzačních kotlů 107–109 % (vztaženo k výhřevnosti) a naměřených hodnot, rozdíl je dán různou metodikou (přímá, nepřímá metoda, viz kap. 3.5). Metoda dle normy ČSN EN 15502-1 + A1 pracuje s useful efficiency (užitečnou účinností), která neuvažuje energií předanou do okolního prostoru zdroje.

Měření účinnosti v nevyčištěném stavu

Schéma zkušebního okruhu na obrázku 1.17 přehledně vystihuje skutečný stav zapojení zobrazený na fotografii obr. 1.18 z průběhu zkoušení.

Zdroj byl zapojen do zkušebního okruhu s deskovým výměníkem, který chladila voda z řadu. Deskový výměník zde představuje otopnou soustavu. Kotel se nastavil na střední hodnotu výkonu (v tomto případě 14 kW), která byla po celou dobu zkoušek konstantní. Vratná voda se nechala ustálit na požadovanou teplotu dle zkoušeného teplotního spádu. Nastavení teplotního spádu probíhalo změnou průtoku na primární a sekundární straně pomocí dvou ventilů (Vp, Vs) ovládaných servopohony s možností nastavení poměru otevření v procentech. V době nastavování protékala chladicí voda na sekundární straně přímo do kanalizace. V okamžiku, kdy bylo dosaženo požadovaného teplotního spádu, bylo možné zapnout a vynulovat váhu pod odměrnou nádobou, spustit měření času a pomocí kulových kohoutů přeměřovat tok do odměrné nádoby. V tomto okamžiku začalo také měření množství plynu.



Obr. 1.17 Grafické znázornění zkušebního okruhu zdroje (autor)

Následujících 10 minut se odměrná nádrž plnila vodou, jejíž teplota se pomocí teploměru s datalogerem každých 10 sekund načítala do paměti. Čidlo tohoto teploměru bylo umístěno v proudu vody tekoucí do odměrné nádoby. V průběhu zkoušky měl být zachován přednastavený teplotní spád. Tlak vody na straně řadu byl ovšem značně proměnný, což mělo vazbu na průtok vody sekundárním (chladícím) okruhem a kolísání teplotního spádu primárního okruhu. Tento jev nabíral na významu při vyšších teplotních spádech, kdy sekundárním okruhem protékalo méně vody o vyšší teplotě. Důsledkem tohoto nepředvídatelného jevu bylo zvoleno ke zkoušení pouze 5 místo původních 7 teplotních spádů. Druhým nepředvídaným činitelem byl vysoký odpor okruhu, z tohoto důvodu bylo po dobu všech zkoušek kromě kotlového čerpadla na stupni II. zapnuto také pomocné čerpadlo s proměnnými otáčkami.



Po uplynutí 10 minut od zahájení zkoušky bylo pomocí kulových ventilů nastaveno proudění chladící vody opět do kanalizace. Následně byla odečtena hodnota plynu na plynoměru (pouze pro kontrolu, průtok plynu se neměnil) a váha vody v odměrné nádrži.

Obr. 1.18 Zapojení zdroje v testovacím okruhu s odběrnou nádobou (autor)

Celý proces se postupně opakoval pro všechny teplotní spády. Některé zkoušky byly pro stejné teplotní spády opakovány dvakrát, neboť na jejich základě se posléze určila nejistota měření, viz příloha č. 2.

Měření tlakové difference v nevyčištěném stavu

Při měření tlakové difference bylo zapnuto pouze kotlové čerpadlo na druhý rychlostní stupeň, výkon kotle byl stále konstantní 14 kW. Na potrubí vstupu a výstupu topné vody z kotle byly nainstalovány vypouštěcí ventily, ke kterým se připojil přístroj pro měření diferenčního tlaku TA Hydronics. Následně byly nastavovány různé hmotnostní průtoky primárním okruhem a současně zaznamenávána naměřená hodnota diferenčního tlaku.

Čištění

Po změření účinnosti a hydraulického odporu bylo dalším bodem programu chemické vyčištění výměníku zdroje. Čištění výměníku zdroje provedla firma AV-EQUEN pomocí čisticího prostředku na kyselé bázi Sentinel Q8010.



Obr. 1.19 Připojení čisticího zařízení na soustavu (autor)



Obr. 1.20 Porovnání čisté a použité filtrační vložky (autor)

Zdroj byl pomocí kulových kohoutů oddělen od soustavy. Na vypouštěcí ventily pod zdrojem bylo místo měřiče diferenčního tlaku připojeno čisticí zařízení AQUA-MAX a separační filtr, jak je vidět na obr. 1.19. Nádoba čisticího zařízení se naplnila vodou a byla spuštěna cirkulace. Postupně se do nádoby čisticího zařízení přidávala chemie. Po krátké chvíli bylo vidět, jak se původně čirá kapalina v transparentním filtru začala měnit. Proces čištění trval přibližně 2 h. Porovnání použité a nové čisticí vložky je vidět na obrázku 1.20. Po ukončení byla čisticí látka ze systému vypuštěna a na okruhu byl zahájen dynamický proplach vodou z řadu, dynamický proplach byl opakován přibližně 5×, dokud nebyla voda v okruhu zdroje čirá. Parametry vody byly měřeny metodou turbidity.

Měření účinnosti ve vyčištěném stavu

Postup obdobný jako při měření účinnosti v nevyčištěném stavu.

Měření tlakové difference ve vyčištěném stavu

Postup obdobný jako při měření diferenčního tlaku v nevyčištěném stavu.

Měření tepelné ztráty zkušební okruhu

Zkušební okruh byl pomocí zdroje natopen na teplotu vyšší než 50 °C. Následně byl zdroj odstaven a okruh přes něj uzavřen pomocí kulových kohoutů. Na vypouštěcí ventily byl instalován zkrat zdroje pro zachování oběhu (na fotografii obr. 1.21 opatřen šedou PE izolací). Po instalaci zkratu a obnovení oběhu topného okruhu pomocí pomocného čerpadla systému byla sledována rychlost poklesu v topném okruhu po dobu třiceti minut. Následně byl topný okruh vypuštěn do nádoby a zvážen. Na základě rychlosti poklesu teploty, znalosti hmotnosti vody v okruhu a teploty okolního prostředí byla spočtena přibližná tepelná ztráta okruhu (6 W.K^{-1}).



Obr. 1.21 Měření tepelné ztráty okruhu (autor)

4.2 Důsledky znečištění teplovodních soustav

Znečištění topného systému, ať už jakéhokoli druhu, má vliv na jeho funkci. Je-li pominut v určitých případech pozitivní vliv ochranné pasivační vrstvy, je tvorba korozivních, minerálních a biologických úsad a kalů nechtěným jevem. Negativní působení se může projevit v různých formách v závislosti zejména na těchto faktorech:

- konstrukční a materiálové složení soustavy a jejich prvků
- parametry plnicí a oběhové vody
- provozní režim, parametry a údržba systému

Projevy, které zanášení provází, mají pak za následek zejména tyto problémy:

- snížení účinnosti systému vlivem úsad ve zdroji
- zvýšení spotřeby energie na čerpací práce
- snížení účinnosti systému vlivem úsad v otopných tělesech
- nedotápění těles, zvukové projevy zrychleného proudění
- snížení životnosti prvků otopné soustavy

Snížení účinnosti systému vlivem úsad ve zdroji

Problematika snížení účinnosti systému vlivem zvýšení tepelného a hydraulických odporů teplosměnných ploch je hlavním nosným tématem experimentu, neboť pomocí těchto parametrů lze exaktně kvantifikovat přínosy čištění. Na příkladu trubkového výměníku z plynového kondenzačního kotle Vaillant bude popsán vliv úsad na funkci zdroje. Tvar a řez výměníkem stejného typu jsou zobrazeny na obr. 1.22 a 1.23 (nejedná se o zkoušený výměník).

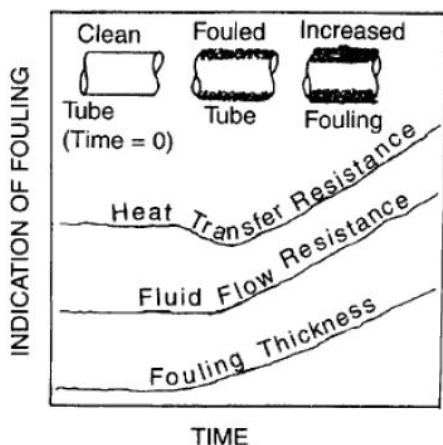


Obr. 1.22 Smyčky výměníku
(Václav Eberl, Vaillant Group Czech)



Obr. 1.23 Řez zaneseným výměníkem
(Václav Eberl, Vaillant Group Czech)

Pro názornost byla u modelového příkladu uplatněna řada zjednodušení. Skutečný tvar výměníku je zjednodušen na dokonale protiproudý výměník z trubek kruhového průřezu o celkové délce 12,56 m a většího průměru 12 mm. Střední teplota topné vody je 57,5 °C, teplota spalin 600°C. Pro samotný výpočet součinitele prostupu tepla běžného metru trubkového výměníku jsou zásadní součinitel přestupu tepla na vnější a vnitřní straně. Stanovení součinitelů přestupu je možné na základě podobnosti tvaru a charakteru proudění pomocí takzvaných kritériálních rovnic. Pomocí těchto rovnic se popisuje chování v mezní vrstvě na stěnách výměníku. Výpočty těchto součinitelů jsou přibližně odpovídající jen v předepsaných mezích platnosti, a to pouze pro stacionární stav. Součinitel přestupu tepla na vnější straně α_{EXT} byly přejat a upraveny z příkladu obdobného smyslu ze Sbírký úloh z Termomechaniky (Jílek, 2004), jejich hodnota je pro oba stavy shodná 36,5 [W.m⁻².k⁻¹]. Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu α_{INT} byly určeny na základě podobnosti pomocí výpočtu kritériálních rovnic. Tyto součinitel se pro stav s úsadami a bez úsad liší. Výpočet součinitelů přestupu tepla na vnitřní straně je v příloze č. 4. Problematika správného určení součinitele přestupu tepla na vnitřní a vnější straně je značně obsáhlá a zejména v oblasti turbulentního proudění může docházet k paradoxním stavům, kdy vrstva úsady zlepšit (zvýší) celkový součinitel přestupu tepla teplosměnné plochy.



Obr. 1.24 Průběh nárůstu úsad (Bott, 1995)

Na základě citlivostní analýzy výpočtového modelu lze říci, že k tomuto stavu, který popisuje i Bott (1995), viz obr. 1.24, dochází zejména při tenké vrstvě úsad vyšší vodivosti tvořených například uhličitánem vápenatým.

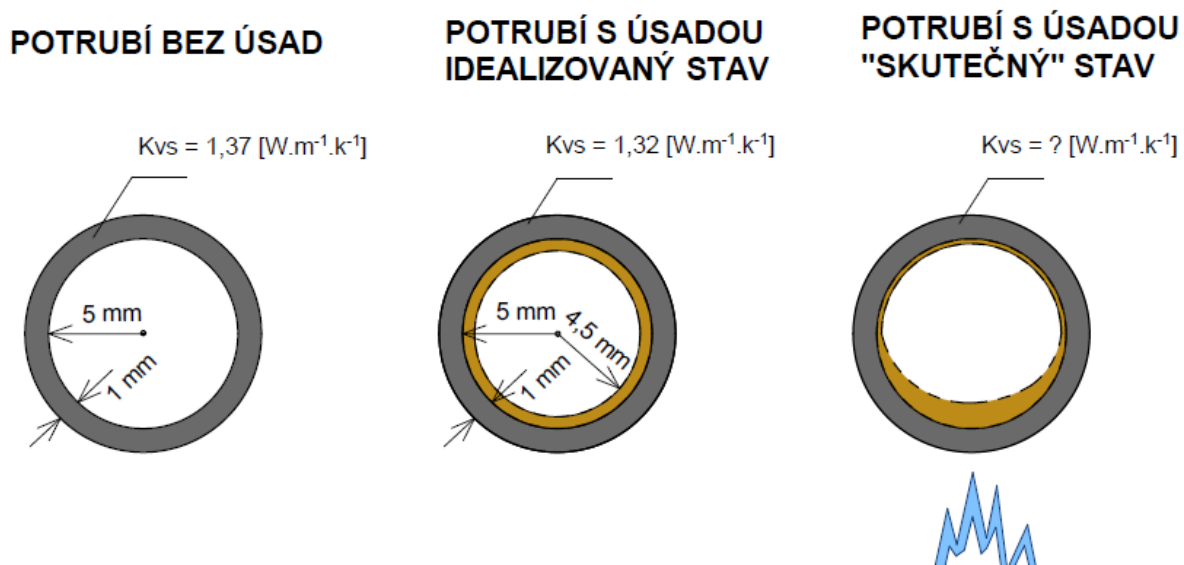
Tepelná vodivost některých materiálů je vyčíslena v tabulce 1.13. Při podrobném zkoumání vstupují do výpočtů další zjednodušení. Tepelná vodivost materiálů je ve skutečnosti závislá na teplotě nikoli konstantní. Charakter proudění úsady ve výpočtu ovlivňují pouze svou tloušťkou, tedy zvýšením rychlosti průtoku, nikoli zvýšenou drsností, což by se více blížilo realitě.

Tab.1.13 Tepelná vodivost vybraných materiálů

ocel	46–52	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
uhličitán vápenatý	2,19	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
uhličitán hořečnatý	0,43	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
biofilm	0,5–0,7	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
korozivní produkty	0,7–0,8	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
oxid hlinitý	0,42	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]

Zdroj: Bott 1995, Vosmik 2014

Dalším problémem je, že vrstva úsad obvykle nevzniká na povrchu rovnoměrně, jak je naznačeno na obr. 1.24 a doloženo skutečným stavem na fotografii obr. 1.23.



Obr. 1.24 Model nárůstu úsady tloušťky 0,5 mm na teplosměnné ploše (autor)

Vstupní parametry pro modelový příklad výpočtu součinitele přestupu tepla:

K_{VS}	součinitel prostupu tepla K_{VS} běžného metru potrubí		$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
λ_V	tepelná vodivost materiál výměníku	50	$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
λ_K	tepelná vodivost vrstvy úsady	0,7	$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
r	vnější poloměr potrubí	0,006	$[m]$
t_S	tl. stěny potrubí	0,001	$[m]$
$t_Ú$	tl. vrstvy úsady	0,0005	$[m]$
α_{EXT}	součinitel přestupu na vnější straně	36,5	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$
α_{INT}	součinitel přestupu na vnitřní straně bez úsad	7594	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$
α_{INT}	součinitel přestupu na vnitřní straně s úsadami	9169	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$

$$K_{VS(s\acute{u}sadami)} = \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{INT} \cdot (r - t_Ú - t_S)} + \frac{\ln \frac{r - t_Ú}{r - t_S - t_Ú}}{\lambda_K} + \frac{\ln \frac{r}{r - t_S}}{\lambda_V} + \frac{1}{\alpha_{EXT} \cdot r} \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{9169 \cdot 0,0045} + \frac{\ln \frac{0,0050}{0,0045}}{0,7} + \frac{\ln \frac{0,0060}{0,0050}}{50} + \frac{1}{36,5 \cdot 0,0060} \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} (0,0242 + 0,1505 + 0,00364 + 4,566) \right]^{-1} = \mathbf{1,32} [W.m^{-1}.k^{-1}]$$

$$K_{VS(bez\acute{u}sad)} = \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{INT} \cdot (r - t_S)} + \frac{\ln \frac{r}{r - t_S}}{\lambda_V} + \frac{1}{\alpha_{EXT} \cdot r} \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{7594 \cdot 0,0050} + \frac{\ln \frac{0,0060}{0,0050}}{50} + \frac{1}{36,5 \cdot 0,0060} \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} (0,0263 + 0,00364 + 4,566) \right]^{-1} = \mathbf{1,37} [W.m^{-1}.k^{-1}]$$

Na idealizovaném modelovém příkladu je zřejmý vliv úsad na součinitel přestupu tepla při turbulentním proudění. Díky zvýšenému tepelnému odporu vrstvy úsad tl. 0,5 mm korozivních kalů poklesne součinitel prostupu tepla o 3,13 %. Pro představu, kdyby korozivní kal měl hustotu 2000 kg/ m³, tloušťka nánosu 0,5 mm na vnitřní ploše výměníku 0,355 m² by znamenala přibližně 350 g nánosu. Na základě výpočtu ϵ NTU (tepelné prodlevy) a tepelné účinnosti výměníku dle ČSN EN 305 byl sestaven výpočtový model pro stav s úsadami tl. 0,5 mm .

Vstupní parametry pro modelový příklad výpočtu účinnosti výměníku při spádu 65/50:

ε	tepelná účinnost výměníku bez uvažování kondenzace		[%]
ε NTU	parametr "tepelné prodlevy"		[-]
$U_{SÚ}$	součinitel prostupu tepla K_{VS} potrubí s úsadou	1,32	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
$U_{BÚ}$	součinitel prostupu tepla K_{VS} potrubí bez úsady	1,37	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
A_s	délka trubkového výměníku	12,56	[m]
C_r	poměr tepelných kapacit	0,01069	[W.k ⁻¹]
C_{min}	tepelná kapacita na straně s nižším průtokem ($m_{t1} \cdot C_{p1}$)	9,31	[W.k ⁻¹]
C_{max}	tepelná kapacita na straně s vyšším průtokem ($m_{t2} \cdot C_{p2}$)	870,83	[W.k ⁻¹]

$$\varepsilon \text{ NTU} = \frac{U_{VSS} \cdot A_s}{C_{min}} = \frac{1,37 \cdot 12,56}{9,31} = 1,85 \text{ [-]}$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{9,31}{870,83} = 0,01069 \text{ [W.k}^{-1}\text{]}$$

$$\varepsilon_{(\text{bez úsad})} = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}}{1 - C_r \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}} = \frac{1 - e^{-1,85 \cdot (1 - 0,01069)}}{1 - 0,01069 \cdot e^{-1,85 \cdot (1 - 0,01069)}} = \mathbf{84,03 \%}$$

$$\varepsilon \text{ NTU} = \frac{U_{VSS} \cdot A_s}{C_{min}} = \frac{1,32 \cdot 12,56}{9,31} = 1,79 \text{ [-]}$$

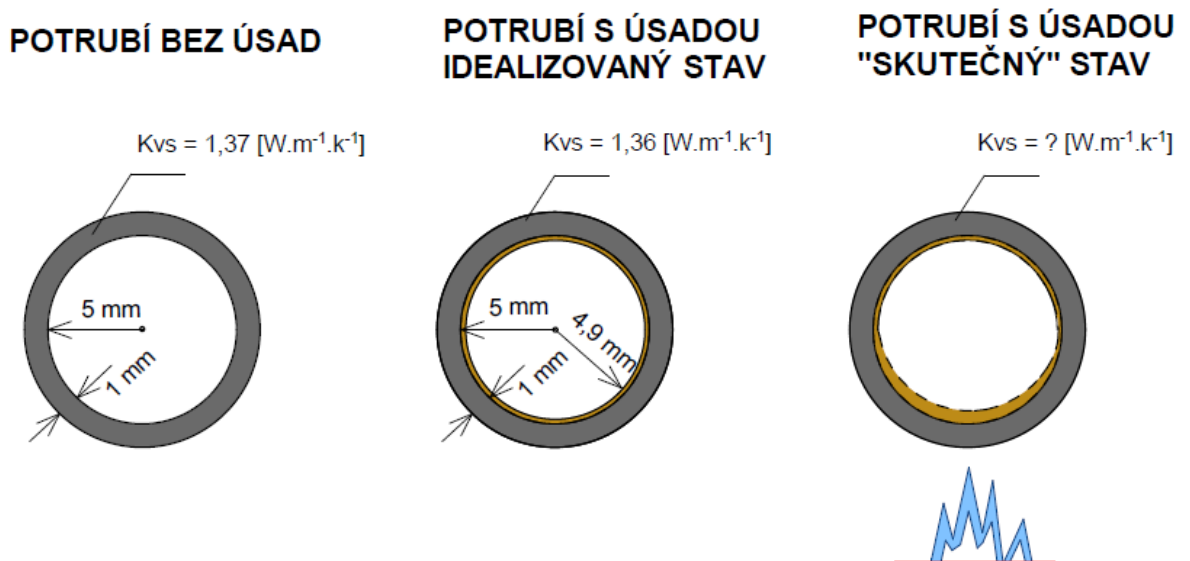
$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{9,31}{870,83} = 0,01069 \text{ [W.k}^{-1}\text{]}$$

$$\varepsilon_{(\text{s úsadami})} = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}}{1 - C_r \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}} = \frac{1 - e^{-1,79 \cdot (1 - 0,01069)}}{1 - 0,01069 \cdot e^{-1,79 \cdot (1 - 0,01069)}} = \mathbf{83,09 \%}$$

Rozdíl účinnosti výměníku dle použité metody vychází přibližně 0,94 %. Vliv tepelného spádu na účinnost je při výpočtu bez uvažování latentního tepla velmi malý.

Citlivostní analýzou a kalibrací výpočtového modelu na změřené rozdíly účinností při teplotních spádech nižších než 55/40 byl model upraven tak, aby lépe odpovídal zkoušenému zdroji. Při nižších teplotních spádech byl během experimentu naměřen rozdíl účinností do 0,2 %, což je výrazně méně než nejistota měření (přibližně 0,5 %), viz příloha č. 2. Dále je tedy uvažováno s premisou, že rozdíl účinností byl skutečně 0,2 % (bez uvažování nejistoty měření). Aby u výpočtového modelu výměníku bylo dosaženo rozdílu účinností 0,2 %, tloušťka rovnoměrně rozložené úsady stejné tepelné vodivosti by nesměla přesáhnout 0,1 mm. S ohledem na

zanedbatelný rozdíl účinností při nižších teplotních spádech je pravděpodobné, že tloušťka úsady ve zkoušeném zdroji skutečně nepřesáhla 0,1 mm.



Obr. 1.25 Model nárůstu úsady tloušťky 0,1 mm na teplosměnné ploše (autor)

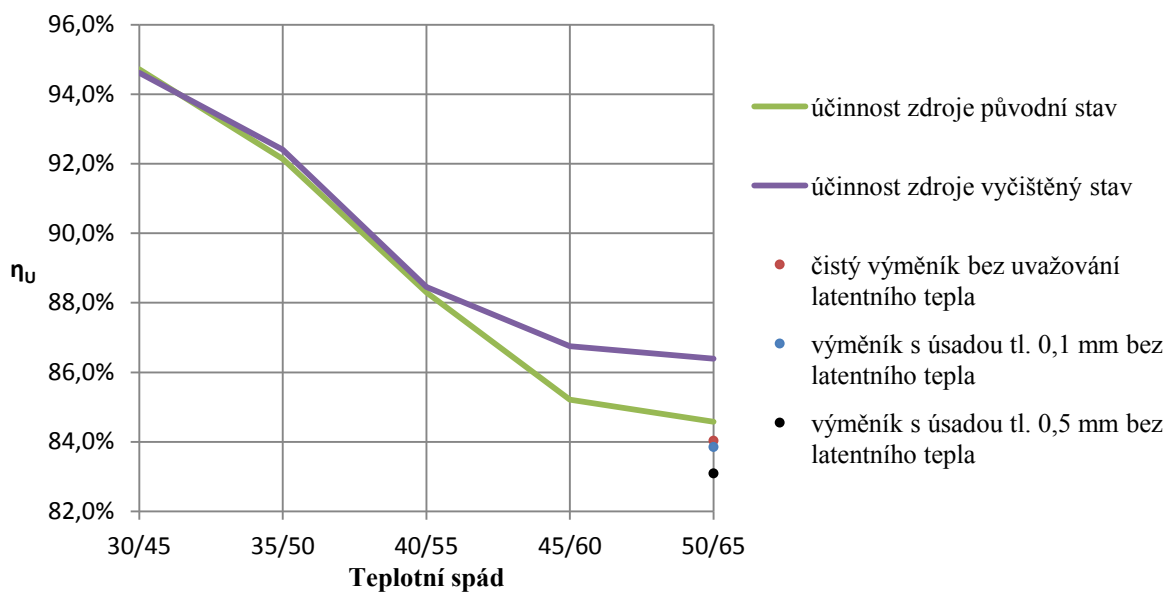
Vstupní parametry pro modelový příklad výpočtu součinitele přestupu tepla :

K_{VS}	součinitel prostupu tepla K_{VS} běžného metru potrubí		$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
Q_{VS}	hustota tepelného toku		$[W.m^{-1}]$
λ_V	tepelná vodivost materiál výměníku	50	$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
λ_K	tepelná vodivost vrstvy úsady	0,7	$[W.m^{-1}.k^{-1}]$
r	vnější poloměr potrubí	0,006	[m]
$tl.S$	tl. stěny potrubí	0,001	[m]
$tl.Ú$	tl. vrstvy úsady	0,00001	[m]
α_{EXT}	součinitel přestupu na vnější straně	36,5	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$
α_{INT}	součinitel přestupu na vnitřní straně bez úsad	7594	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$
α_{INT}	součinitel přestupu na vnitřní straně s úsadami	7874	$[W.m^{-2}.k^{-1}]$

$$\begin{aligned}
 \text{Zdroj: autor} \\
 K_{VS(s \text{ úsadami})} &= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{INT} \cdot (r - t_{\dot{U}} - t_S)} + \frac{\ln \frac{r - t_{\dot{U}}}{r - t_S - t_{\dot{U}}}}{\lambda_K} + \frac{\ln \frac{r}{r - t_S}}{\lambda_V} + \frac{1}{\alpha_{EXT} \cdot r} \right) \right]^{-1} \\
 &= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{7874 \cdot 0,0049} + \frac{\ln \frac{0,0050}{0,0049}}{0,7} + \frac{\ln \frac{0,0060}{0,0050}}{50} + \frac{1}{36,5 \cdot 0,0060} \right) \right]^{-1} \\
 &= \left[\frac{1}{2\pi} (0,0259 + 0,0289 + 0,00364 + 4,566) \right]^{-1} = \mathbf{1,36 [W.m^{-1}.k^{-1}]}
 \end{aligned}$$

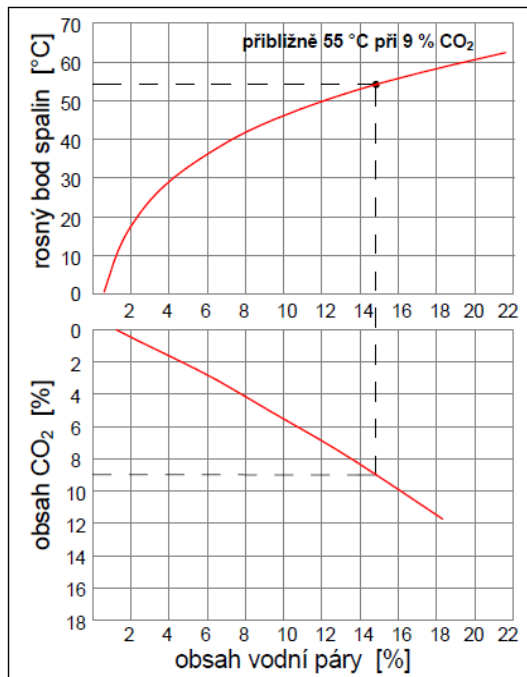
$$\begin{aligned}
K_{VS(\text{bez úsad})} &= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{INT} \cdot (r - t_s)} + \frac{\ln \frac{r}{r - t_s}}{\lambda_V} + \frac{1}{\alpha_{EXT} \cdot r} \right) \right]^{-1} \\
&= \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{7594 \cdot 0,0050} + \frac{\ln \frac{0,0060}{0,0050}}{50} + \frac{1}{36,5 \cdot 0,0060} \right) \right]^{-1} \\
&= \left[\frac{1}{2\pi} (0,0263 + 0,00364 + 4,566) \right]^{-1} = \mathbf{1,37 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]}
\end{aligned}$$

Kalibrační výpočtového modelu na změřené hodnoty je prokázán předpoklad téměř nezaneseného výměníku, kde tloušťka úsad na vnitřní straně je do 0,1 mm, viz obr. 1.25. Proložení křivek účinnosti výměníku křivkami naměřené účinnosti během experimentu je zřejmé, že ke snížení účinnosti dochází vlivem omezení kondenzace, viz graf na obr. 1.26.

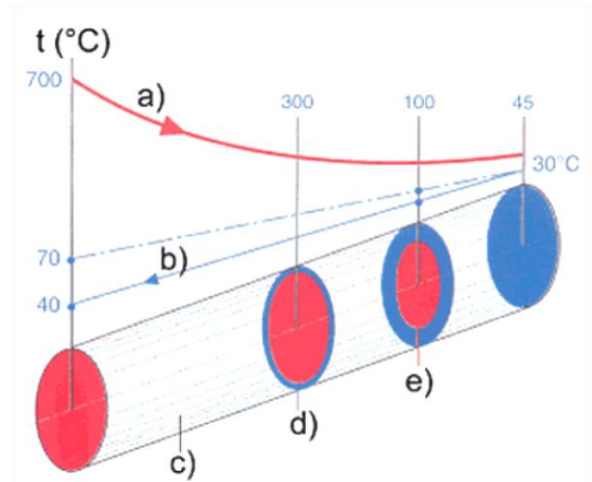


Obr. 1.26 Porovnání účinnosti „useful efficiency“ zdroje před a po čištění (autor)

Z grafu na obr. 1.26 vyplývá, že úsady poměrně malé tloušťky mohou mít znatelný vliv na účinnost, což je u zkoušeného zdroje pozorovatelné zejména v pásmu částečné kondenzace mezi teplotními spády 40/55 a 50/65. V této oblasti dochází na malém teplotním rozhraní (jednotek stupňů) mezi teplotou zpátečky a teplotou spalin k významné změně účinnosti s ohledem na to, jestli vůbec a kolik vodní páry kondenzuje na povrchu výměníku. Zjednodušeně řečeno, zda je teplota některé části výměníku ještě pod rosným bodem spalin. Tímto lze vysvětlit rozptyl vyčištěného proti nevyčištěnému stavu, který je patrný z grafu na obr. 1.26.



Obr. 1.27 Rosný bod spalin zemního plynu (Jelínek, 2003)

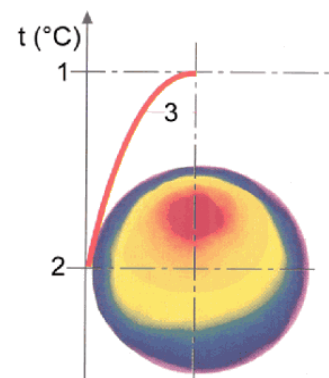


a - průběh teploty spalin, b - průběh teploty kotlové vody, c - spalinová cesta výměníkem, d - kondenzační zóna, e- teplota jádra spalin, v modře vyznačené oblasti probíhá kondenzace

Obr. 1.28 Znázornění průběhu teplot ve výměníku (Bašta, 2006)

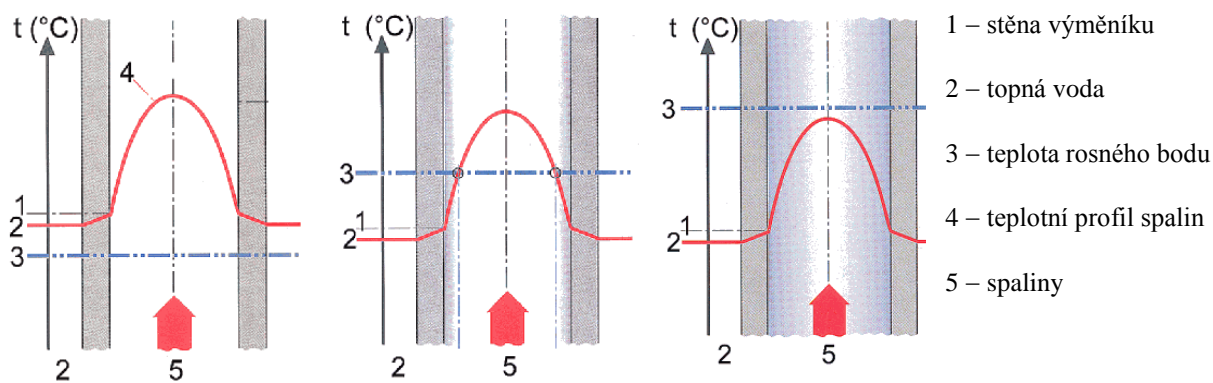
Rosný bod spalin zemního plynu lze vyjádřit jako křivku závislosti množství CO_2 ve spalinách. Během zkoušení bylo průběžně měřeno množství CO_2 analyzátozem. Z obsahu CO_2 ve spalinách, který se pohyboval kolem 9 %, je možné z grafu 1.27 určit teplotu rosného bodu. O kondenzaci dle Bašty (2006) rozhodují dvě kritéria: teplota jádra spalin a povrchová teplota teplosměnné plochy. Ve zkoušeném plynovém kondenzačním kotli se nacházel protiproudý výměník, jako na obrázku 1.08. Rozložení teplot spalin, jádra spalin a pásma kondenzace v různých částech po délce typického protiproudého výměníku je zřejmé z obrázku 1.28. Teplotní profil proudění v kruhovém prostoru uvnitř trubkového výměníku je zobrazen na obr. 1.29.

„Podle polohy a tvaru teplotního profilu a průběhu teploty rosného bodu můžeme rozlišit tři typické provozní stavy” (Bašta, 2006). Na obrázku 1.30 vlevo je naznačen stav, kdy nedochází ke kondenzaci. Toto nastává, když je teplota vratné vody vyšší než rosný bod spalin. Ve střední části obrázku je zobrazen stav částečné kondenzace, kdy je teplota vratné vody nižší než rosný bod spalin, ale teplota jádra spalin je nad teplotou rosného bodu. Třetí případ zobrazený vpravo značí úplnou kondenzaci v celém průřezu proudy spalin.



1- jádro proudy spalin, 2 - stěna, 3 - teplotní profil v proudovém průřezu

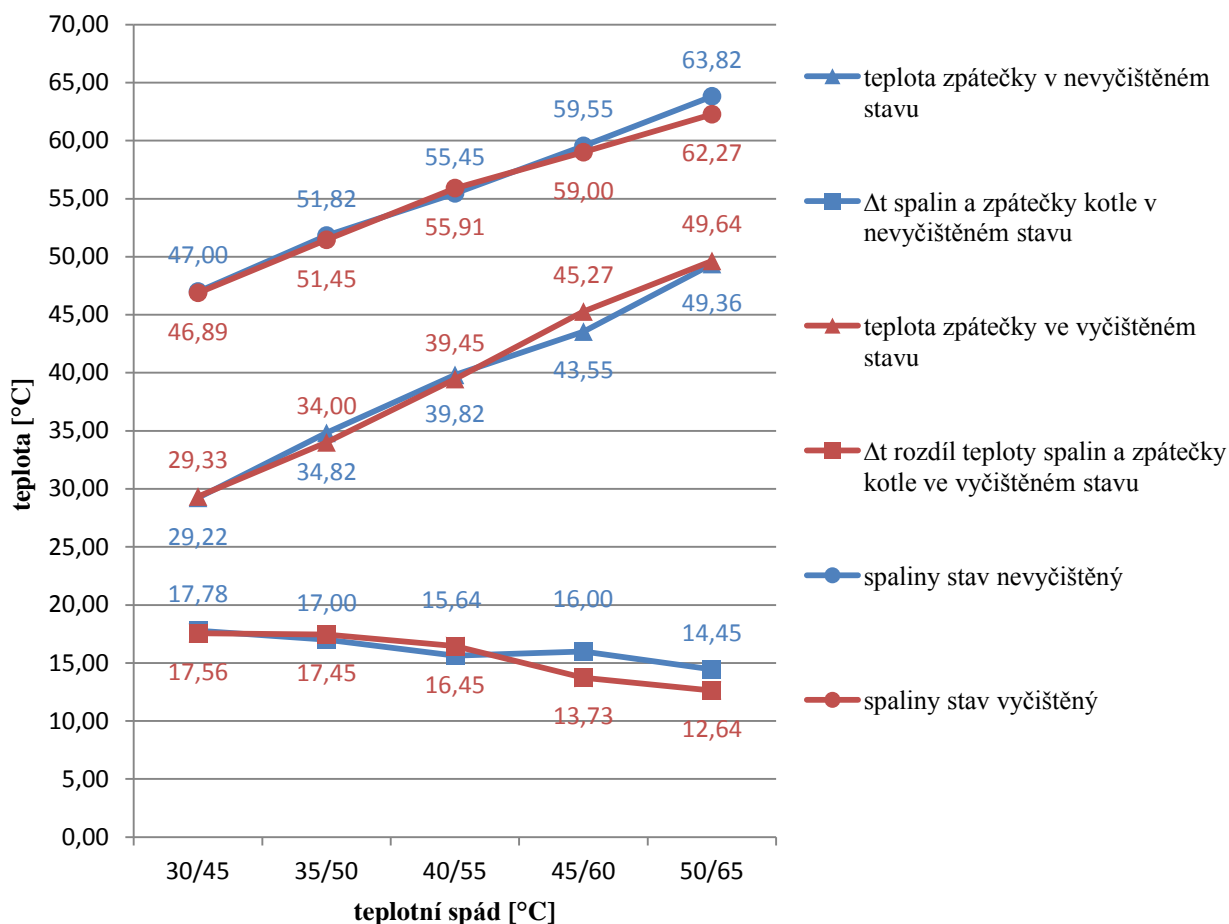
Obr. 1.29 Proudění spalin výměníkem (Bašta, 2006)



Obr. 1.30 Typické provozní stavy plynového kondenzačního kotle (Bašta, 2006)

Jak je vidět z předchozích obrázků (1.28–1.30), kondenzace probíhá pouze na části z teplosměnné plochy výměníku. Především pak na zadních smyčkách, kde je teplota spalín nejnižší. Z tohoto důvodu je pro účinnost kondenzačního kotle rozhodující teplota vratné, nikoli výstupní topné vody.

Bohužel měřený zdroj vykazoval pouze minimální zanesení. Skutečné množství úsad nebylo z technických důvodů možné zpětně zjistit, nicméně tl. úsad větší než 0,1 mm nelze s ohledem na výpočtový model předpokládat. Vizuální průzkum výměníku rovněž nenaznačoval přítomnost tuhých úsad. Na vnitřní straně byla opticky zjištěna pouze přítomnost slabé povlakové vrstvy korozivního kalu. Chování kotle v provozu i při plném výkonu také nenaznačovalo zanesení výměníku. Takové projevy mohou často být akustické (mikrovary), vyšší Δt mezi teplotou spalín a zpátečkou kotle, v pokročilém stádiu pak přetápění a cyklování zdroje. Z grafu na obr. 1.31 jsou zřetelné změny teploty spalín a jejich rozdílu Δt vůči vratné vodě při teplotních spádech 45/60 a 50/65 ve vyčištěném a nevyčištěném stavu. Při těchto teplotních spádech byla účinnost η_u ve vyčištěném stavu vyšší přibližně o 2 %, jak je patrné z grafu na obr. 1.26.



Obr. 1.31 Rozdíly teplot spalin a vratné vody zdroje (autor)

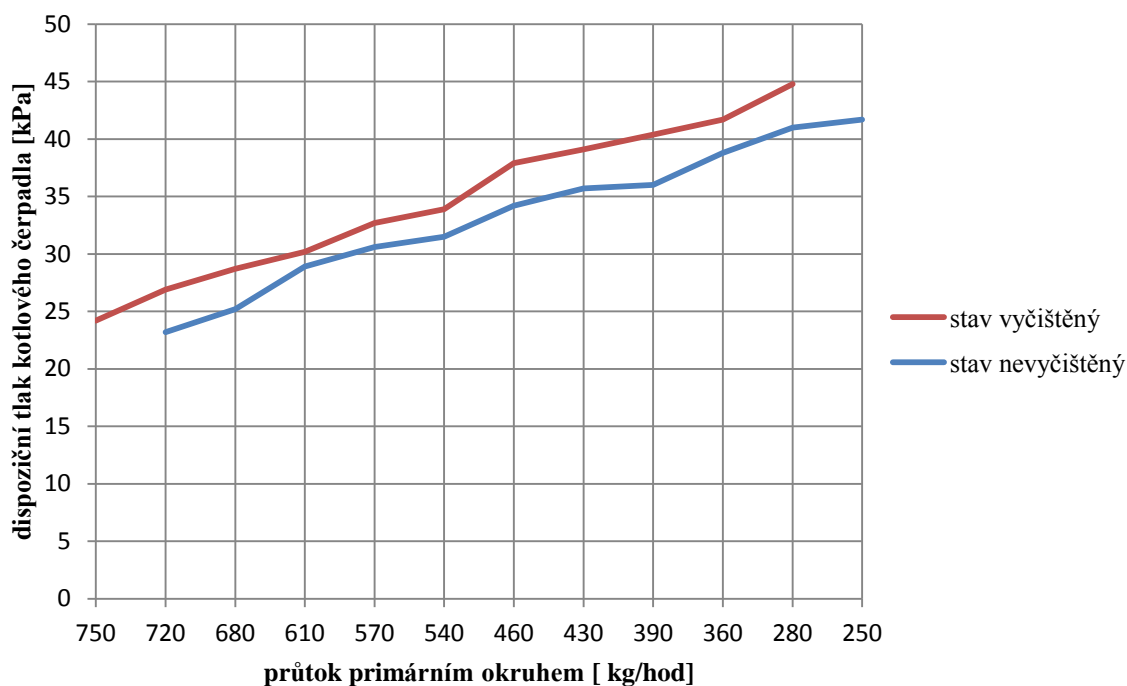
Průběh křivek teploty spalin a vratné vody potvrzuje výsledky experimentu, neboť při vyšších teplotních spádech 45/60 a 50/65 je zřejmá nižší Δt mezi teplotou spalin a zpátečkou kotle, což ukazuje na vyšší míru využití energie paliva.

Zvýšení spotřeby energie na čerpací práce

V souvislosti se změnou drsnosti a snížení průtočného průřezu vlivem úsad narůstá tlaková ztráta výměníku i celé otopné soustavy. V zásadě mohou nastat dva stavy:

- V případě, kdy je v okruhu nebo zdroji instalováno čerpadlo s konstantními otáčkami, dochází ke snížení rychlosti proudění. Menší hmotnostní průtok vody má za následek zvýšení teploty topné vody ve výměníku, což následně vyvolává zejména v oblasti kondenzace snížení účinnosti zdroje.
- V případě, kdy je v okruhu nebo zdroji instalováno čerpadlo s proměnnými otáčkami, dochází ke snížení rychlosti proudění až v případě, když tlakové ztráty výměníku překonají dispoziční tlak čerpadla pro odpovídající průtok. Nicméně je zde nutné si uvědomit vazbu mezi

příkonem čerpadla a velikostí tlakové ztráty, kterou musí čerpadlo překonávat. V příloze č. 3 je pro zkušební okruh vyčíslena orientační roční spotřeba el. energie čerpadla s proměnnými otáčkami pro vyčištěný a nevyčištěný zdroj na základě rozdílu změřené tlakové ztráty během experimentu zobrazené na grafu obr. 1.32. V modelovém příkladu s čerpadlem o přibližném výkonu 25 W je rozdíl spotřeby el. energie minimální, cca. 6 kWh/rok, ale lze si představit případy (větších soustav s větším množstvím úsad), kdy ani tento faktor nebude zcela zanedbatelný.



Obr. 1.32 Hydraulický odpor výměníku zdroje (autor)

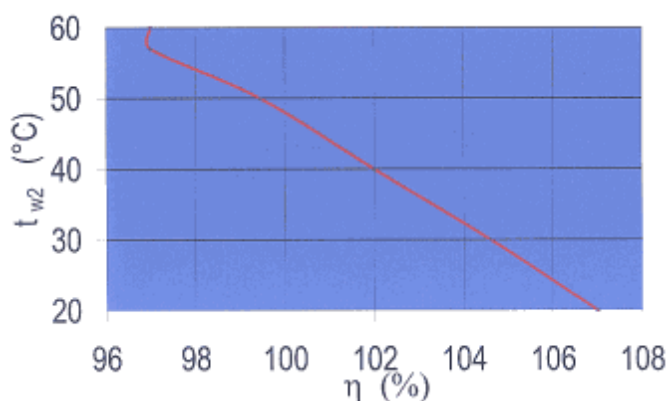
Při významném zvýšení tlakových ztrát (bez ohledu na typ čerpadla) může teplota ve zdroji vzrůst nad maximální provozní teplotu. Zdroj je pak zásahem řídicí elektroniky odstaven, což vyvolává cyklování (periodicky se opakující spínání a vypínání zdroje). Projev cyklování lze popsat jako stav, kdy zdroj není schopen výkon hořáku předat do otopné soustavy. Teplota ve zdroji narůstá, až dojde k překročení maximální provozní teploty a zásahu regulace, která zdroj odstaví. Pokud dojde k překročení pouze maximální provozní teploty a nikoli havarijní teploty, obvykle elektronika počká, až teplota zdroje poklesne pod nastavenou mez a zdroj se znovu spustí. Následně teplota ve zdroji s omezeným průtokem opět narůstá, až dojde k dalšímu odstavení. Tyto děje se mohou opakovat po několika minutových až desítky minutových cyklech v závislosti na stupni zanesení a nastavení řídicí elektroniky zdroje. Z praktického hlediska je nutné upozornit na úsady a nečistoty v průtočných profilech oběhových kol čerpadel. Ty

i v případě velmi malého množství mohou významným způsobem přispívat ke snížení průtoku a výše zmíněným negativním jevům.

Cyklování velmi významným způsobem snižuje účinnost zdroje, protože zdroj několik minut po startu není provozován v optimálním režimu. Toto lze přirovnat k analogii neplynulé jízdy automobilem. Zároveň zvýšený počet startů namáhá součásti zdroje a zvyšuje riziko poruch.

Snížení účinnosti systému vlivem úsad v otopných tělesech

Účinnost zdrojů tepla využívajících latentního tepla spalin (především plynové kondenzační kotle) je významným způsobem závislá na teplotě vratné vody do zdroje (t_{w2}), jak je naznačeno na obrázku 1.33. Pro dosažení nejvyšší účinnosti je nutné, aby voda na vratném potrubí zdroje měla co nejnižší teplotu. Rozdíl účinnosti zkušebního zdroje na grafu obr. 1.26 a typického zdroje obr. 1.33 je dán odlišnou metodikou zkoušení, viz kap. 4.1.2.

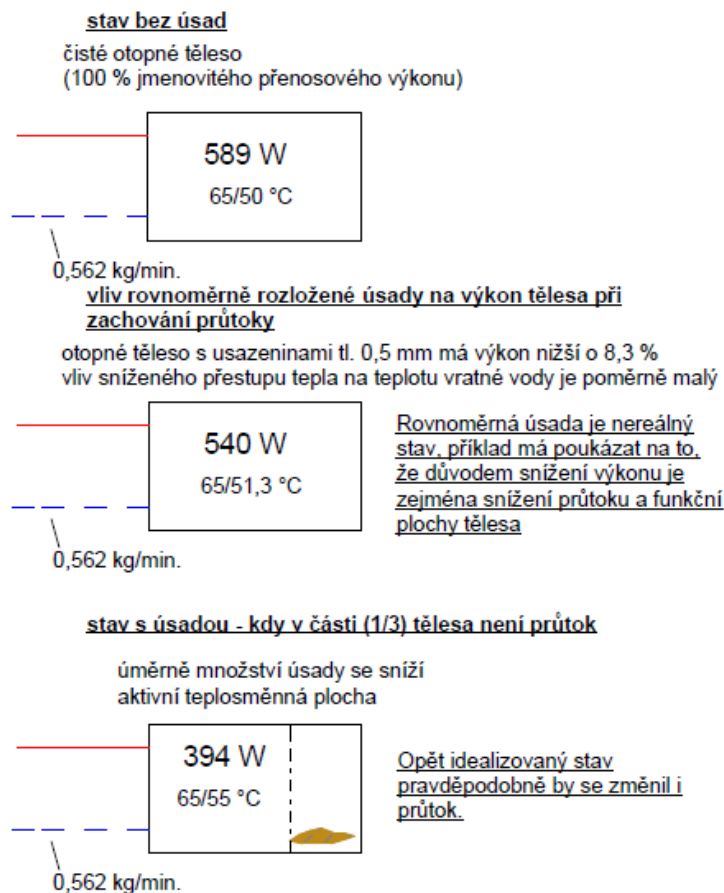


Obr. 1.33 Závislost teploty vratné vody na účinnosti typických pl. kondenzačních kotlů (Bašta, 2006)

Na příkladu výpočtu přestupu tepla deskového otopného tělesa viz příloha č. 7 je zřejmé, že i úsady v otopných tělesech budou mít vliv na účinnost zdroje tepla. Prostřednictvím horšího (nižšího) součinitele přestupu tepla a zvýšením hydraulického odporu totiž dochází ke zvýšení teploty vratné vody. Jakým způsobem mohou úsady v otopných tělesech ovlivňovat teplotní spád soustavy je zobrazeno na schématu obr. 1.34.

Výpočtem jednoduchého modelu deskového otopného tělesa bylo zjištěno, že úsady korozivních kalů na vnitřních plochách otopných těles zhoršují (snižují) součinitel přestupu tepla a tím výkon poměrně málo. K poklesu výkonu otopných těles vlivem úsad dochází především z důvodu vyšších tlakové ztráty a následně sníženého hmotnostního průtoku topné vody. Vlivem vyšší tlakové ztráty tak často teplonosná kapalina neproudí přes celé těleso, ale protéká cestou nejmenšího odporu jen některými kanálky, kde se ovšem nestihne vychladit na uvažovaný

teplotní spád. Výkon takového otopného tělesa se významně sníží a teplota vratné vody zvýší. V případě ještě výraznějšího zvýšení hydraulického odporu bude průtok minimální a těleso se stane nefunkčním.

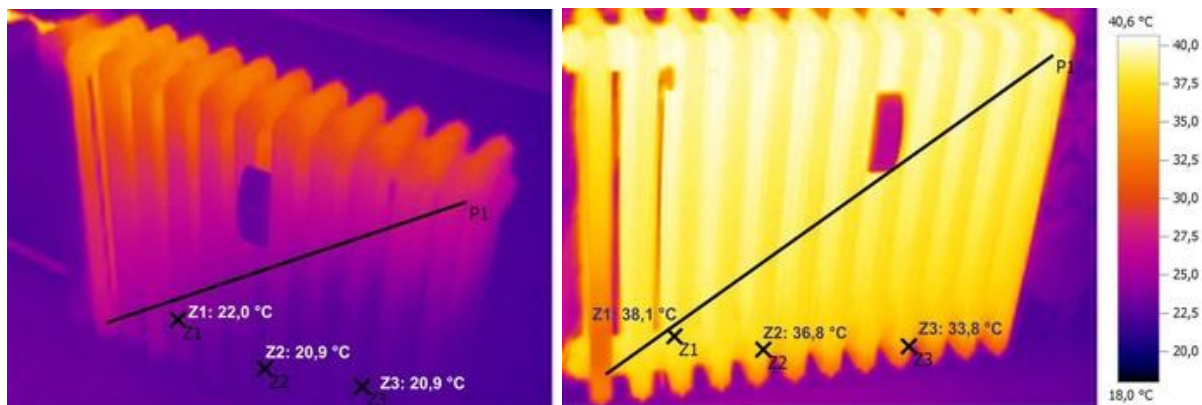


Obr. 1.34 Vliv úsad na teplotní spád soustavy (autor)

Skutečné stavy, které v případě tvorby úsad v topných soustavách nastávají, mají vazbu na způsob regulace zdrojů, řízení oběhových čerpadel, rozmístění úsad, teplotní spády atd. Z tohoto důvodu nelze obecně kvantifikovat energetické dopady úsad uvnitř otopných ploch. Výše zmíněné hodnoty jsou pouze výpočtovým příkladem platným za uvedených okrajových podmínek.

Nedotápění těles, zvukové projevy zrychleného proudění

Úsady hromaděné v otopné soustavě mění její hydraulické poměry, což má vliv na velikost hmotnostních průtoků jednotlivých částí. Z tohoto důvodu vzniká problém s vyvážením soustavy a nedotápěním některých otopných těles. Příklad rozdílu rozložení teplot před a po vyčištění článkového otopného tělesa je vidět na obr. 1.35 (část vlevo před čištěním, pravá část po čištění).



Obr. 1.35 Pohled termokamerou na článkové otopné těleso před a po čištění (Krych, 2014)

Úsady a nečistoty uvolněné v otopné soustavě mohou v otopných tělesech sedimentovat nebo mohou být zachytávány v úzkých profilech mezi kuželkou a sedlem ventilů nebo kanálcích otopných těles, kde následně zvýšená rychlost proudění generuje rušivé zvuky. Fotografie na obrázku 1.36 zobrazuje řez článkem otopného tělese silně zaneseného úsadami.



Obr. 1.36 Úsady v otopném tělese (Krych, 2014)

Snížení komfortu vlivem hluků a špatné funkce otopných těles lze jen obtížně vyjádřit, stejně tak vliv na životnost. Často ovšem mohou mít tyto obtížně vyjádřitelné následky pro uživatele zásadnější význam než exaktně měřitelné ukazatele zvýšené spotřeby energií.

Snížení životnosti prvků otopné soustavy

Parametry napouštěcí a otopné vody, které neodpovídají požadavkům (viz kap. 3.4), mohou způsobit korozi otopných systémů, poškození nebo zhoršení funkce prvků soustavy, zejména čerpadel, ventilů, výměníků. Na obrázku 1.37 je zobrazena prasklá spalovací komora kondenzačního plynového kotle, poškození velmi pravděpodobně nastalo z důvodu ucpání chladících kanálek kotelním kamenem. Na obrázku 1.38 je vidět vypouštění silně znečištěné topné vody z neprůchodného podlahového systému vytápění. Na obrázku 1.39 jsou zobrazeny úsady v kole oběhového čerpadla zdroje. V takovém případě hrozí kromě nižšího výkonu zadření oběhového kola a poškození motoru čerpadla.



Obr. 1.37 Prasklá spalovací komora kondenzačního plynového kotle (autor)



Obr. 1.38 Znečištěná topná voda v podlahovém systému vytápění (autor)



Obr. 1.39 Nečistoty v oběhovém kole čerpadla (autor)

4.3 Opatření pro ochranu soustavy

Tato kapitola je koncipována jako postupným výčet kroků, jak postupovat při návrhu nové soustavy, během zprovoznění a provozování soustavy, aby čištění nebylo v budoucnu nutné.

Opatření vedoucí k prevenci a předcházení problémům v souvislosti s úsadami by stejně tak, jako v jiných oborech, měla být vždy upřednostňována před kroky nápravnými. Minimálně proto, že i z hlediska ekonomického bývají často výrazně výhodnější. Opatření z hlediska prevence a minimalizace rizik lze dělit dle fáze, ve které se systém nachází:

- fáze přípravy a tvorby projektové dokumentace
- fáze realizace systému a uvedení do provozu
- fáze provozní

V dalších třech podkapitolách budou pro jednotlivé fáze ve stručnosti popsány nejdůležitější zásady a poznatky vycházející z kompilátu norem, odborné literatury a zkušeností pracovníků

oborů vytápění a úpravy vody, se kterými jsem se během práce setkal. Doporučení se týkají primárně návrhu nových otopných soustav. V případě rekonstrukcí, například při náhradě zdrojů do stávajících topných systémů, je třeba přistupovat individuálně a s patřičnou obezřetností, případně přijmout dodatečná opatření pro ochranu nového zdroje.

4.3.1 Fáze přípravy a tvorby projektové dokumentace

Samozřejmě nejúčinněji a s nejmenšími náklady lze provádět opatření vedoucí k minimalizaci rizika vzniku úsad a koroze ve fázi přípravy. Již od koncepce návrhu teplovodní soustavy je vhodné se zamýšlet nad rizikovými faktory tvorby koroze, úsad a zhodnotit míru ohrožení. V následujících odstavcích jsou uvedeny, stěžejní oblasti pro kontrolu návrhu.

Úprava plnicí a dopouštěcí vody

Pakliže kvalita vody z místního vodovodního řádu nesplňuje parametry vody napouštěcí dle ČSN 077401 (u zdrojů nad 60 kW) nebo výrobci zdrojů požadují splnění parametrů dle VDI 2035, je třeba vodu upravovat. S tím souvisí návrh technologického zařízení úpravy vody. V České republice nejsou normy obecně závazné, jestliže nejsou zezávaněné právním předpisem nebo smlouvou. Z tohoto důvodu je na zodpovědnosti projektanta, jakým způsobem k řešení problému přistoupí. Druhým úhlem pohledu jsou záruční podmínky výrobců kotlů, kteří vyžadují převážně dodržení parametrů napouštěcí a oběhové vody dle VDI 2035. Součástí uvedení zdroje do provozu a následných servisních prohlídek je pak často změření parametrů plnicí vody a oběhové vody. V případě poškození zdroje vodou s nevyhovujícími parametry nelze v budoucnu uplatňovat záruky, neboť nebyly dodrženy podmínky provozu. Samotný návrh technologie chemické úpravy vody by měl být ideálně předmětem spolupráce projektanta vytápění se specializovanou firmou v oboru úprava vody. Nebo předmětem subdodávky.

Materiálové složení soustavy – Kombinace různých kovů, zejména s velmi rozdílným redoxním potenciálem (měď – hliník), podporuje migraci iontů a elektrochemickou korozi. Vysoký podíl plastového potrubí (např. podlahového vytápění), zejména bez kyslíkové bariéry, může působit korozivně na nepoměrně menší ploše kovových teplosměnných ploch. U soustav s hliníkovými prvky je třeba zohlednit specifické požadavky na pH vody (viz kap. 3.4). Doporučením tedy může být volit materiálové složení soustavy bez výrazného rozdílu redoxního potenciálů jeho částí. V případě použití plastových potrubí pak zohlednit parametry kyslíkové bariéry.

Logické členění otopné soustavy na uzavíratelné celky

Jedním z rizikových faktorů ovlivňujících tvorbu úsad je časté doplňování a výměna vody. Pokud není voda upravená, přináší s sebou kyslík i soli alkalických zemin, proto VDI 2035-1 předepisuje za dobu životnosti soustavy maximálně trojnásobnou výměnu vodního objemu soustavy. Navíc ve vypuštěné části systému začíná ihned probíhat koroze za přístupu vzduchu.

Někdy je nutné v systému provést opravy, a proto vypustit část systému. Cílem by mělo být objem měněné topné vody minimalizovat. Z tohoto důvodu je třeba už při návrhu počítat s rozmístěním uzavíracích ventilů a v případě potřeby rozdělit systém na několik částí. Při opravě poté vypustit pouze část systému, které se zásah týká. Doporučením tedy může být navrhnout dostatečné množství uzavíracích prvků, zejména na části systémů s velkým objemem vody. Rozdělení kotelny do logických celků, například akumulární nádrž, expanzí nádrž, příprava TV, jednotlivé topné větve. V objektu poté instalovat uzávěry pro jednotlivá patra nebo byty. V částech, kde je možné vypuštění, by měly být osazeny také vypouštěcí ventily.

Přístup kyslíku do soustavy a její těsnost

Kyslík se do soustavy dostává v rozpuštěné formě plnicí vodou, difuzí kyslíku přes stěny, negativním tlakem (podtlakem v části soustavy) nebo stykem s atmosférou při opravách. V dnešní době se již používají výhradně uzavřené expanzní nádrže, ale u starších systémů s otevřenou expanzní nádrží je nutno počítat také se vstupem kyslíku přes otevřenou vodní hladinu.

Souhrn doporučení v tomto případě může být následující. Dodržení přetlaku 50 kPa v každé části soustavy, používání expanzních nádrží s membránou a inertním plynem, potrubí s kyslíkovou bariérou. U soustav s automatickým doplňováním musí být množství doplňovací vody měřeno. Všechny části soustavy musí být možné spolehlivě odvzdušnit, podrobněji v kap. 4.4.2.

Velikosti teplosměnných ploch v souvislosti s objemem soustavy

V případě zdrojů s malou teplosměnnou plochou, např. závěsné plynové kotle, a velkým objemem soustavy je na zvážení provedení dodatečných opatření pro úpravu napouštěcí vody (demineralizaci). Podobný přístup je vhodné uplatnit v případě, když výměník zdroje je jediná kovová teplosměnná plocha soustavy. V takovém případě výrazně narůstá riziko koroze a je na zvážení eliminace kyslíku.

Vliv teplotních spádů

Zvláště při nižších teplotních spádech (podlahové vytápění) je vhodné se zamýšlet nad činností mikroorganismů. V případě vhodných podmínek tvoří mikroorganismy slizové útvary, které významným způsobem ovlivňují průtok podlahových smyček a funkčnost systému. V těchto případech je odůvodněný návrh biocidních přípravků do plnicí vody.

4.3.2 Fáze realizace a uvedení do provozu

Správné uvedení do provozu má pro tvorbu úsad zásadní význam. Před napuštěním soustavy vodou by měl proběhnout proplach systému roztokem vody s odmašťovadly. Tento krok je u nových systémů důležitý zejména z důvodu odstranění mastnoty na vnitřním povrchu otopných ploch a nečistot vzniklých při montáži. U stávajících soustav, například při výměně zdroje, může být proplach součástí realizace čištění otopné soustavy od úsad a kalů, více o tomto postupu v kap. 4.6.

Účinnost proplachu v případě nového systému se významně zvýší při teplotě vody cca. 60°C a přidáním odmašťovadla. Proplach s pomalým ohřevem vody má minimální vliv na tvorbu kotelního kamene, neboť trvá velmi krátce, řádově několik desítek minut. Naopak značně nepříznivý vliv mohou mít na topný systém opakované tlakové zkoušky potrubí, po kterých následuje vypuštění a vnitřní povrch potrubí je poté ve styku se vzduchem.

Po propláchnutí je ideální systém ihned napustit napouštěcí vodou předepsaných parametrů. Parametry plnicí vody je vhodné zaznamenat do provozního deníku kotelny, případně protokolu uvedení kotle do provozu, spolu s množstvím plnicí vody. Tlak vody v systému musí být minimálně o 50 kPa vyšší, než je hydrostatický tlak odpovídající výšce soustavy. Následuje odvzdušnění soustavy při vypnutém oběhovém čerpadle. Odvzdušněná soustava může pak být pomalu natápěna nízkým výkonem zdroje. V případě více zdrojů v systému je vhodný společný start všech, neboť úsady se poté tvoří na veškerých teplosměnných plochách zdrojů rovnoměrně. Během zátopu se provádí plynulé zvyšování výkonu a odvzdušňování soustavy. Konečné odvzdušnění je poté provedeno při maximální provozní teplotě systému. V tomto stavu je pak možné provést zaregulování systému. Jestliže pH napouštěcí vody je mimo interval 7 – 8,5 nebo jsou jiné pochybnosti o chování soustavy a kvalitě vody, v odstupu 8–12 týdnů se provede odběr a kontrola hodnot.

4.3.3 Fáze provozní

Provozu zdroje, kotelny a celé otopné soustavy by se měla věnovat příslušná pozornost s ohledem na velikost, způsob obsluhy, rizikové faktory systému a nákladově optimální řešení. Z hlediska koroze a tvorby úsad je třeba sledovat a zaznamenávat zejména množství doplňovací vody, funkci úpravny vody (je-li instalována), parametry oběhové vody (pH, solnost, vodivost, mikrobiální aktivita). Pakliže jsou do vody přidávány chemické přípravky, tak také záznamy o těchto látkách. Četnost sledování a kontroly by měla být předepsána projektovou dokumentací.

4.4 Základní možnosti úpravy vody v topných systémech

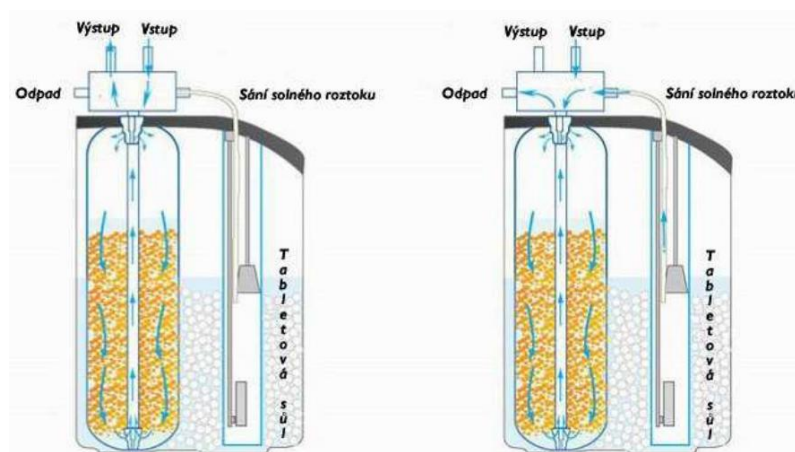
4.4.1 Úprava tvrdosti vody

Význam tvrdosti vody na tvorbu úsad je podrobně popsán v literární části. Normové požadavky na kvalitu topné a napouštěcí vody zmíněné v kapitole 3.4 v některých případech předepisují parametry, kterých je možné dosáhnout pouze úpravou tvrdosti vody. Pro úpravu napouštěcí vody běžných otopných systémů se používá především úprava pomocí měniče iontů. Měníče iontů lze rozlišit na dvě skupiny, první skupina provádí změkčování (tedy odstraňuje pouze Ca^{2+} a Mg^{2+}), druhá skupina provádí demineralizaci (tedy úplné odsolení vody).

Změkčování – měničem iontů

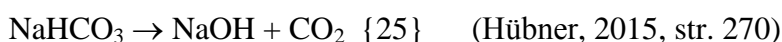
Obecně vžitě označení „Katex“ (měnič kationtů) nemusí ve všech případech odpovídat skutečnému typu zařízení, v průmyslových aplikacích se lze setkat i s měniči aniontů nebo jejich kombinací. Úprava vody touto metodou je primárně určena pro úpravu pitné vody, ale ne vody topné. Naopak, katexové změkčení vody není pro otopné systémy zcela vhodné, neboť následným zahřátím takto změkčené vody dochází k nekontrolovanému zvyšování pH.

Katex funguje na principu iontové výměny, obvykle se jedná o nádrž naplněnou zrnky pryskyřice se záporným nábojem, podobně jako na obr. 1.40. Činitelé tvrdosti vápník a hořčík mají kladný náboj (Ca^{2+} , Mg^{2+}) a jsou tedy přitahovány a vázány na povrch zrněk pryskyřice. Kationty (Ca^{2+} , Mg^{2+}) jsou nahrazeny Na^+ , který vytváří sloučeniny rozpustné do vysokých koncentrací, nehrozí tedy vznik úsad. Po čase je kapacita výměny iontů vyčerpána a je nutná regenerace náplně (pryskyřice). K tomu dochází reakcí pryskyřice se solným roztokem NaCl, přitom dochází k odplavení chloridů vápníku a hořčíku mimo katex (do kanalizace). Následně je z nádoby odstraněn slaný roztok a zregenerovaný katex je připraven na změkčování vody. Celý proces je většinou automatický.



Obr. 1.40 Schematický řez měničem iontů (vlevo plnění soustavy, vpravo regenerace zařízení) (13)

Použití katexu snižuje pouze tvrdost vody, solnost a konduktivita se mění jen nepatrně. Negativní konsekvencí je skutečnost, že se kationy sodíku (Na^+) vážou na hydrogenuhličitaný (HCO_3^-) za vzniku NaHCO_3 . Při zahřívání poté dochází k rozkladu dle rovnice:



Vzniklý NaOH alkalizuje kotelní vodu. Pokud je následkem vzniklého NaOH pH příliš vysoké, vyšší než předepsané hodnoty dle norem, s ohledem na materiál soustavy může docházet k rozpuštění ochranné vrstvy a korozi systému (Hübner, 2015, str. 270).

Demineralizace – měničem iontů

Principiálně obdobné řešení s tím rozdílem, že při tomto způsobu jsou všechny rozpuštěné ionty (solnost) nahrazovány ionty vodíku a hydroxylovými ionty, které se následně změní na molekuly vody. Regenerace pryskyřice se provádí pomocí kyseliny chlorovodíkové a sodného louhu, které náplni dodávají ionty vodíku a hydroxyly.

Demineralizační měnič iontů (viz obr. 1.41) poskytuje výhodu, neboť záměnou za vodíkové a hydroxylové ionty v budoucnu nedochází k ovlivňování pH ze strany NaOH, navíc dochází k odstranění všech solí, nejen Ca^{2+} a Mg^{2+} . Při použití demineralizační jednotky je důležité zachovat tvrdost (1–2°dH), která je důležitá pro ústojnou kapacitu vody (viz kap 3.2.3).



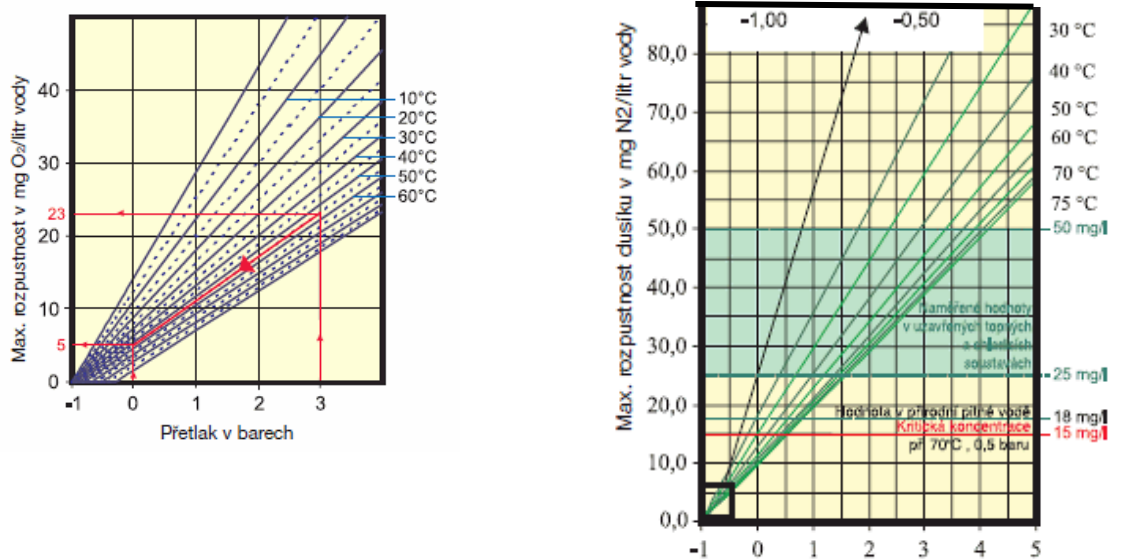
Obr. 1.41 Mobilní demineralizační jednotka (14)

4.4.2 Úprava obsahu kyslíku v soustavě

Existují dvě hlavní motivace pro odstraňování plynů z otopné soustavy. V první řadě hromadění plynů v soustavě omezuje cirkulaci teplotnosné kapaliny bez ohledu na to, o jaký plyn se jedná. Za druhé některé plyny (O_2 , CO_2) působí v systému korozivně. Plyny vstupují do soustavy společně s napouštěcí vodou. Na základě průměru měření bylo ve vodě z vodovodního řadu zjištěno 11 mg/l kyslíku a 18 mg/l dusíku rozpuštěného ve vodě, kromě toho také oxid uhličitý (Vaněk, 2009). Následně se mohou plyny dostávat do soustavy i během provozu, vlivem netěsností a podtlaku v některých částech, importem difuzně otevřenými plochami a dokonce se mohou v soustavě tvořit jako produkty chemických reakcí.

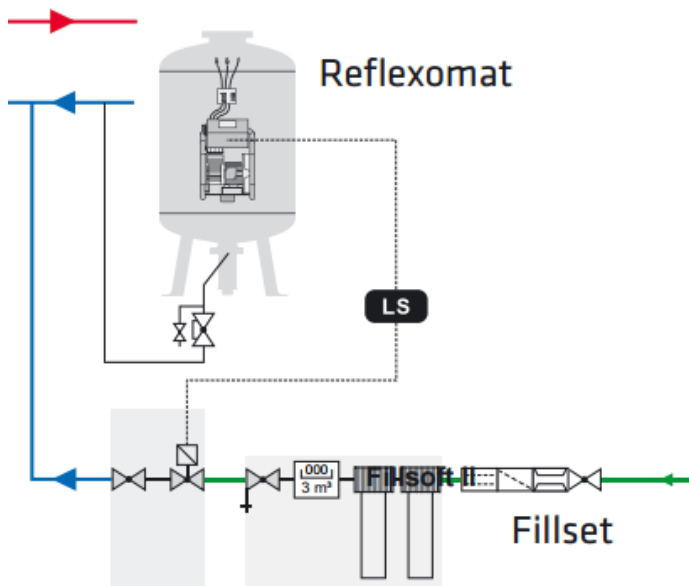
Kyslík reaguje (oxiduje) vnitřní povrchy v otopném systému v závislosti na materiálu, jeho koncentrace se tak samovolně snižuje, čemuž se v případech významnějšího korozního rizika snažíme předcházet způsoby zmíněnými v následujícím odstavci. Naproti tomu rozpuštěný dusík je vůči vnitřním povrchům otopného systému netečný. Rozpustnost plynů je závislá na tlaku a teplotě a v případě, že je koncentrace překročena, dochází k hromadění plynu v soustavě a poruchám cirkulace. Maximální rozpustnost plynů v závislosti na tlaku a teplotě je vyjádřena v grafu na obrázku 1.42

K odplynění v teplovodních otopných soustavách se používají odvzdušňovací ventily, případně odvzdušňovací nádoby nebo odvzdušňovací atmosférické nebo vakuové automaty. Z grafů na obr. 1.42 vyplývá, že rozpustnost plynů ve vodě klesá při snižování jejího tlaku a zvyšování teploty. Aby nedocházelo k vylučování plynů, musí být i v nejvyšším místě soustavy zajištěn přetlak 50 kPa. Dusík tak zůstává i při koncentraci 0,15 mg/l a teplotě 70°C rozpuštěn ve vodě.



Obr. 1.42 Závislost rozpustnosti plynů na tlaku (Vaněk, 2009) Tlak v barech

U větších otopných soustav se v praxi problematika odplynění řeší instalací komplexních zařízení expanzních automatů s úpravou doplňovací vody. Lze dohledat u výrobců, např. Reflex, Olymp, sestavy pak mohou vypadat jako na schématu na obr. 1.43.



Obr. 1.43 Příklad sestavy expanzního automatu se systémem odplynění a úpravou vody (15)

K odstranění kyslíku z topné vody se používá chemická nebo termická metoda:

Chemická metoda

Představuje především použití siřičitanu Na_2SO_3 , který kyslík váže. Norma ČSN 077401, platná pro soustavy se zdroji nad 60 kW, udává nutnost jeho stálého přebytku v oběhové vodě 10–40 mg/l. Je zde ovšem nutné vnímat fakt, že norma s ohledem na dobu svého vzniku (1992) předpokládala významnou dotaci kyslíku přes dříve běžné, ovšem dnes překonané otevřené expanzní nádoby.

Termická metoda

Je doménou především zdrojů vyšších výkonů v oboru energetika. Jedná se o tepelnou úpravu vody v odplynovači. V odplynovači je nejčastěji pomocí prostupující páry voda ohřívána pod bod varu, čímž se z ní uvolňují všechny rozpuštěné plyny. Extrahované plyny jsou odváděny pryč a odplyněná voda je připravena k použití v otopném systému. Při tomto způsobu dochází kromě odstranění kyslíku k odstranění volného CO_2 a dusíku.

4.5 Možnosti čištění otopných soustav

Obecně lze čištění otopných soustav rozdělit na mechanické a chemické. Mechanické čištění se používá především v průmyslových aplikacích. Tam, kde je to možné, by mělo být právě mechanické čištění upřednostněno (Bott, 1995). Toto se týká především zdrojů velkých výkonů, kde je přístup k čištění teplosměnných ploch dán jejich rozměry a konstrukčním řešením (rozebiratelností). Ve většině teplovodních otopných soustavách budov s ústředními zdroji ovšem mechanické metody čištění uplatnit nelze. V tomto segmentu má tedy velký potenciál čištění chemické. Mechanické i chemické čištění je možné s ohledem na omezení provozu rozdělit na dva druhy:

Online čištění

Tato metoda je použitelná v případě menšího znečištění nebo tam, kde není možná odstávka systému. Při jejím uplatnění není přerušen provoz systému.

Offline čištění

Tato metoda se používá v případě vyšší míry znečištění a je při ní nutná odstávka provozu otopného systému.

Mechanické čištění:

- online: vzduchové rázy, čištění průtlačným míčkem vkládaným do systému, čištění abrazivními prostředky (kartáčky) poháněnými prouděním, sonické rázy.
- offline: manuální odstraňování úsad, čištění povrchů vysokotlakovými čističi, tryskání abrazivním materiálem, čištění abrazivní dopravovanou směsí.

Chemické čištění:

- online: dávkování chemie (na neutrální bázi) do systému za současné filtrace uvolněných nečistot.
- offline: čištění proplachem směsí na kyselinové bázi, čištění párou s obsahem kyselin

4.6 Postup chemického čištění soustavy v praxi

Pro kvalifikovaný návrh čištění stávající otopné soustavy je třeba vycházet z velkého množství okrajových podmínek a jde vždy o individuální záležitost. Samotná volba metody by měla být vždy podložena alespoň základní analýzou typologie usazenin a příčin jejich vzniku. To lze na



Obr. 1.44 Mobilní zkušební sada (16)

základě průzkumu systému a použitých materiálů, porovnání parametrů vzorků topné vody a napouštěcí vody, znalosti zásahů z provozního deníku do jisté míry predikovat. Při volbě analytických metod je samozřejmě nutné zohlednit nákladově optimální úroveň vzhledem k rizikům a velikosti soustavy. Zvolený přístup analýzy a čištění otopné soustavy rodinného domu se může a pravděpodobně také bude lišit od postupu čištění otopné soustavy s kotelnou I., II. nebo III. kategorie.

Pro čištění menších otopných soustav, kterými jsou v tomto případě myšleny takové s objemem topné vody v řádu stovek litrů, se dnes nabízí použití orientačního měření parametrů svépomocí nebo poučenou montážní firmou. Na trhu existují mobilní sety (viz obr. 1.44) k určení tvrdosti, konduktivity, pH a mikrobiální aktivity topné vody pomocí indikativních prostředků: lakmusové papírky – pro určení pH, titrační zkouška – určení tvrdosti, optická škála zákalu, měřič konduktivity, zkouška přítomnosti bakterií živným papírkem. Úspěch zvolené metody čištění pak závisí především na správné interpretaci výsledků měření a zkušenosti autora návrhu. V takovémto případě lze doporučit volbu topenářské firmy s patřičnými zkušenosti.

Pro čištění rozsáhlejších otopných soustav, rámcově tedy takových, jejichž zdroje již spadají do kategorie kotelen nebo objem topné vody je v řádu tisíců litrů, lze pro určení typologie usazeniny a příčin jejího vzniku doporučit podrobný chemický rozbor topné vody. Samozřejmostí je pečlivá analýza otopného systému, materiálového složení, porovnání výsledků rozborů topné vody s parametry vody napouštěcí, zohlednění úprav vody a jiných zásahů zmíněných v provozním deníku. V neposlední řadě také uvážení dalších možných konsekvencí zmíněných v teoretické části práce (teplotní spády, import kyslíku, hustota tepelného toku, fyzikální faktory proudění atd.). V těchto případech se jeví optimální spolupráce specializované topenářské firmy s chemickou laboratoří nebo subdodavatelem s adekvátním vybavením a zkušenostmi.

Jak už bylo zmíněno v kap. 4.5, z hlediska možností uplatnění různých metod čištění se v případě teplovodních otopných soustav s ústředním zdrojem tepla jeví nejvýhodnější čištění chemické.

Obecně lze chemické čištění popsat jako (Bott,1995) v následujících krocích takto:

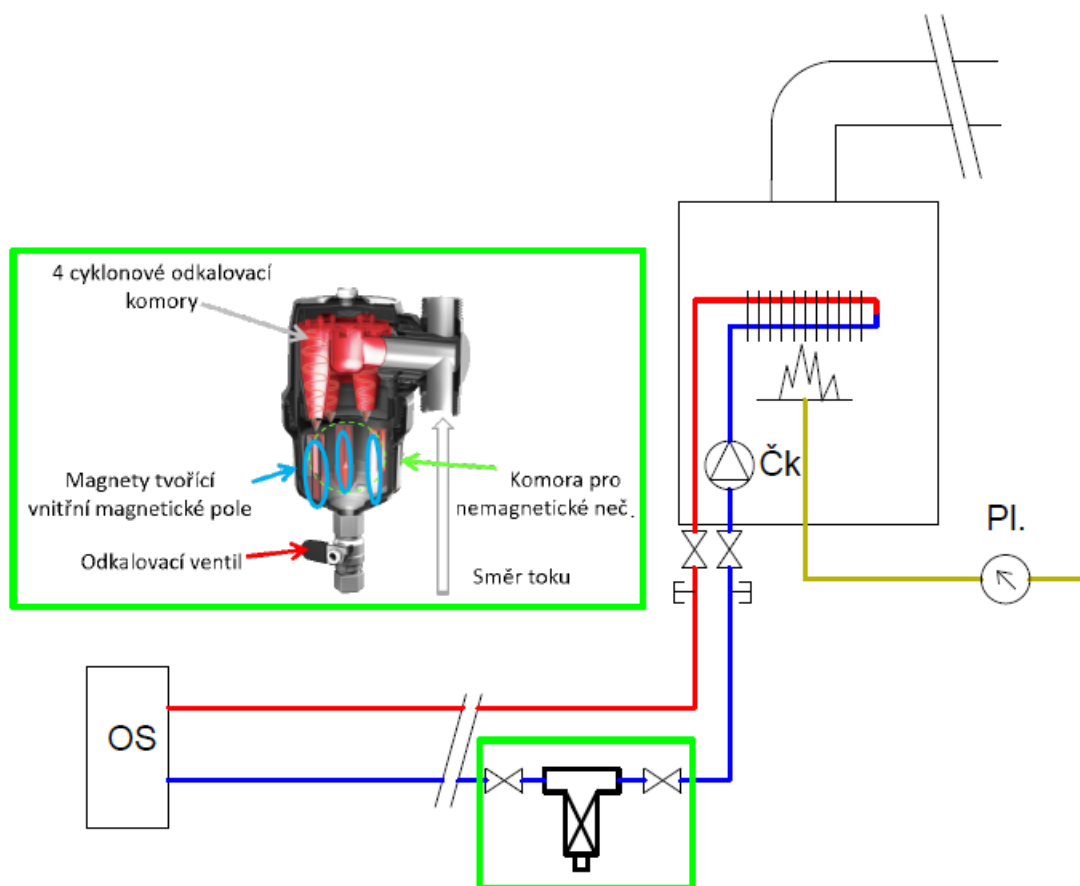
1. Odstranění uvolněných nečistot proplachem.
2. Ohřívání a cirkulace vody.
3. Přidání čisticí chemie a inhibitorů (jsou-li) třeba do oběhové vody.
4. Po určené době cirkulace vypuštění čisticí směsi a proplach systému.
5. Pasivace kovových povrchů
6. Proplach a odstranění veškerých stop chemických prostředků ze systému.

Bott (1995) v publikaci popisuje dva způsoby chemického čištění, online a offline metodou. Online metoda je použitelná v případě menšího znečištění nebo tam, kde není možná odstávka systému. Při jejím uplatnění není přerušen provoz systému. Offline metoda se používá v případě vyšší míry znečištění a je při ní nutná odstávka provozu otopného systému. V praxi lze s výhodou obě metody kombinovat. Krátkodobé offline čištění je použito jako předčištění pro dlouhodobější online čištění za provozu.

Z hlediska použité chemie lze rozlišit dvě báze, neutrální a kyselinovou. Čisticí prostředky na kyselinové bázi se vyznačují vysokou rychlostí a účinností. Bott (1995) uvádí především používání chemie na bázi kyseliny chlorovodíkové, sírové a fosforečné. Jejich nevýhodou je, že po rozpuštění usazenin, které mají obvykle v různých částech soustavy odlišnou tloušťku vrstvy, rozpouštějí také materiály samotné soustavy. Navíc v otopných soustavách mohou být zastoupeny různé materiálové báze, což vytváří další problém. Proto se tento způsob čištění používá zejména v průmyslových aplikacích, kde je možné s ohledem na výši investičních nákladů zajistit adekvátní rozsah prací nezbytných pro kvalitu čištění. Druhým způsobem je chemické čištění prostředky na neutrální bázi, což znamená, že jejich pH je neutrální a po rozpuštění usazenin nehrozí poškození prvků soustavy. Tyto čisticí prostředky působí mnohem pomaleji v řádu dnů až týdnů, což ovlivňuje rozdílnou metodiku čištění obou prostředků. Chemické složení je součástí know-how výrobců. Zásadní výhodou neutrální báze je bezpečnost obsluhy i ochrana soustavy samotné před rizikem poškození. Z tohoto důvodu se zdá, že jsou tyto prostředky pro čištění běžných otopných soustav výhodnější.

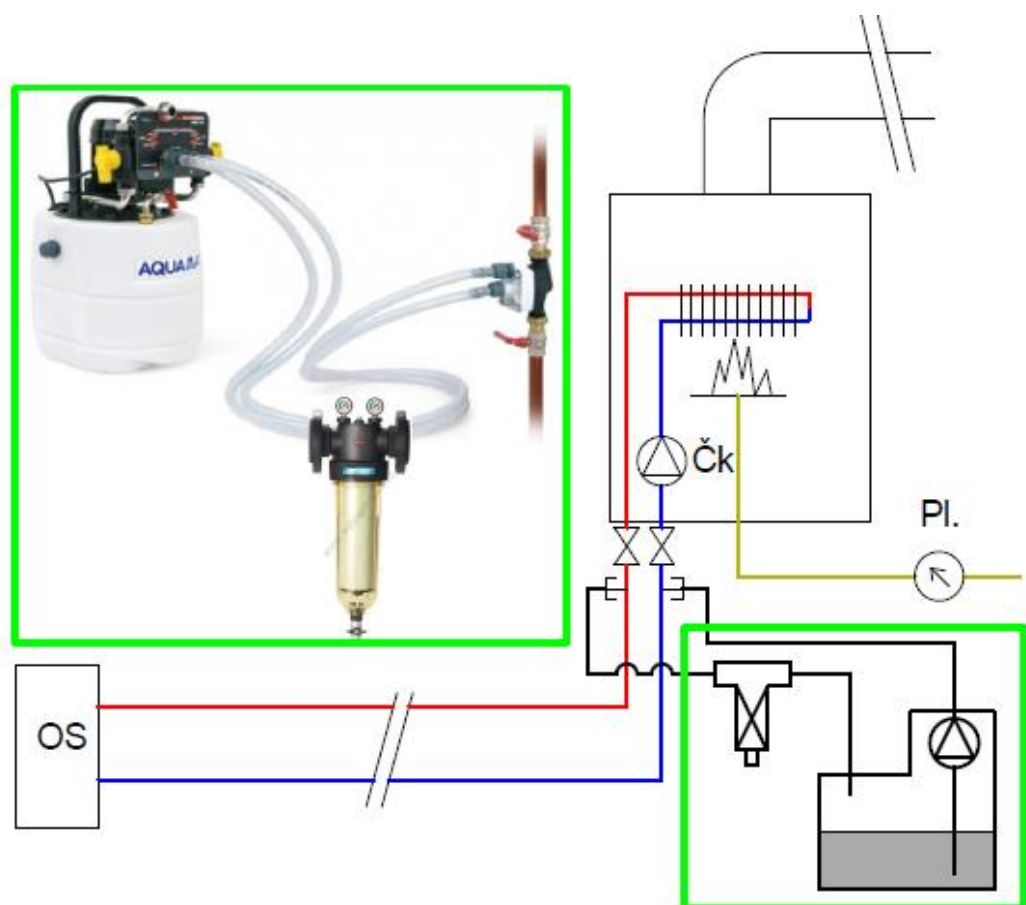
Na evropském trhu se vyskytuje řada výrobců čisticích směsí, například Sentinel, Kanco, Fernox, Adey, Aqua max či Manta.

Dle výsledků analýzy se zvolí nejvhodnější metoda čištění, typ filtrů a čisticí směs. Schéma na obrázku 1.45 značí chemické čištění online metodou na neutrální bázi. Filtr se naplní čisticí chemií a vřadí se do okruhu. Dávkování potřebného množství chemie je možné přes uzavíratelný filtr. Okruh lze takto zanechat prakticky neomezeně dlouho v řádu týdnů až měsíců, po tuto dobu je nutné filtr pravidelně čistit, odkalovat a sledovat změnu parametrů vody. V případě online čištění bez proplachu je nutné použít adekvátní čisticí kapalinu pro trvalý styk se soustavou. V případě, že parametry topné vody vyhovují a není nutná její výměna, lze tento způsob čištění uplatnit. Online čištění je vhodné pro mírnější znečištění především bakteriemi, kaly a měkkými usazeninami nebo jako sekundární fáze čištění po aplikaci offline metody.



Obr. 1.45 Schéma čištění online metodou (autor)

V případě, že parametry topné vody neodpovídají požadavkům, míra zanesení je vyšší a úsady jsou korozivními produkty nebo vodním kamenem, je nutné uplatnit offline metodu čištění. Postup aplikace této metody je zobrazen na obrázku 1.35. Postup začíná proplachem soustavy vodou z vodovodního řadu pro odstranění volných nečistot, následně je k okruhu přes vypouštěcí ventily napojeno čisticí zařízení s vlastním oběhovým čerpadlem a filtrem. Čisticí chemie se dává přímo do nádoby zařízení. Během cirkulace se postupně zavírají jednotlivé okruhy a otopná tělesa, aby v každé součásti alespoň po krátký čas v řádu jednotek až desítek minut byl maximální průtok. Dle rozsahu soustavy a použitého typu chemie poté čištění trvá v řádu několika hodin až dnů. Po vyčištění je proveden proplach vodou z řadu, dokud není voda na výstupu čirá a prostá chemických prostředků. Vyžaduje-li to zvolený typ chemie, napustí se soustava vodou s příměsí pasivačních činidel. Po předepsané době působení pasivačních přípravků se aplikuje opět proplach. Nakonec se systém naplní vodou odpovídajících parametrů.



Obr. 1.46 Schéma čištění offline metodou (autor)

Kalkulace orientační ceny čištění:

Analýza vody testovací sadou	100,- bez DPH
Analýza vody podrobný rozbor	2000,- bez DPH

Offline čištění

Čistící chemie na 100 litrů objemu soustavy	500,- bez DPH
Hodinová sazba pracovníka provádějící čištění	600,- bez DPH

Online čištění

Separáční filtr + instalace	5000,- bez DPH
Čistící chemie na 100 litrů objemu soustavy	500,- bez DPH
Hodinová sazba pracovníka provádějící čištění	600,- bez DPH

Doba potřebná k čištění je velmi individuální. Orientačně se obvykle cena čištění otopné soustavy rodinného domu pohybuje mezi 5000 – 10 000,- bez DPH. V případě větších soustav dle množství potřebné chemie a rozsahu prací.

Zdroj: (20)

5 Diskuze výsledků

Práce byla založena na popisu možností čištění otopných systémů vhodných pro aplikaci v teplovodních soustavách s ústředním zdrojem tepla. Při popisu jsem vycházel z odborné literatury, informací výrobců, ze zkušeností realizačních firem a z provedeného experimentálního měření. V teoreticko-metodologické části práce seznamuje s problematikou související s tématem, tedy souvislostmi mezi tvorbou úsad, kvalitou vody, konstrukčním a materiálovým řešením soustavy a způsobem provozování. V aplikační části byl na zkušebním okruhu ověřován rozdíl účinnosti zdroje před a po chemickém vyčištění výměníku. Na základě změřených hodnot, výpočtů a abstrakce souvislostí byly obecně popsány další možné konsekvence provázející tvorbu úsad.

Z výsledků vyplývá vliv úsad v těchto rovinách:

- energetické ztráty na zdroji tepla vlivem snížení účinnosti výměníku
- energetické ztráty na zdroji vlivem cyklického provozu
- energetické ztráty vlivem vyšší teploty zpátečky (kondenzační zdroje)
- energetické ztráty vlivem zvýšené tlakové ztráty a práce čerpadel
- rušivé hluky na kuželkách termoregulační ventilů a v kanálcích otopných těles
- zvýšené riziko korozního napadení vnitřních povrchů otopných soustav
- snížená životnost prvků soustavy

Na základě experimentu se stanovením rozdílu účinnosti zkušebního kondenzačního kotle se podařilo prokázat, že při vyšších teplotních spádech (60/45 a 65/50), kdy se teplota vratného potrubí přiblížila k rosnému bodu spalin, v tomto případě (55°C), se projevil lepší přestup tepla vyčištěného výměníku. To mělo za následek využití vyššího množství latentního tepla spalin a tedy zvýšení účinnosti, v měřeném úseku byl maximální rozdíl účinnosti přibližně 2 %. Skutečnost, že se rozdíl účinnosti neprojevil u nižších teplotních spádů, lze vysvětlit tím, že při teplotě vody ve vratném potrubí pod 40°C probíhala kondenzace na dostatečně velkém povrchu výměníku, bylo tedy využíváno stejného množství latentního tepla i v případě mírně zhoršeného přestupu tepla. Jakmile však teplota vratné vody začala stoupat nad 40°C, zhoršený součinitel přestupu tepla způsobil zvýšení povrchové teploty nevyčištěného výměníku a schopnost jímat latentní teplo spalin tak začala mít stále menší část výměníku.

Zjednodušeným výpočtovým modelem účinnosti výměníku bylo zjištěno, že pokud by výměník nebyl schopný předávat latentní teplo, ale pouze teplo citelné, jeho účinnost

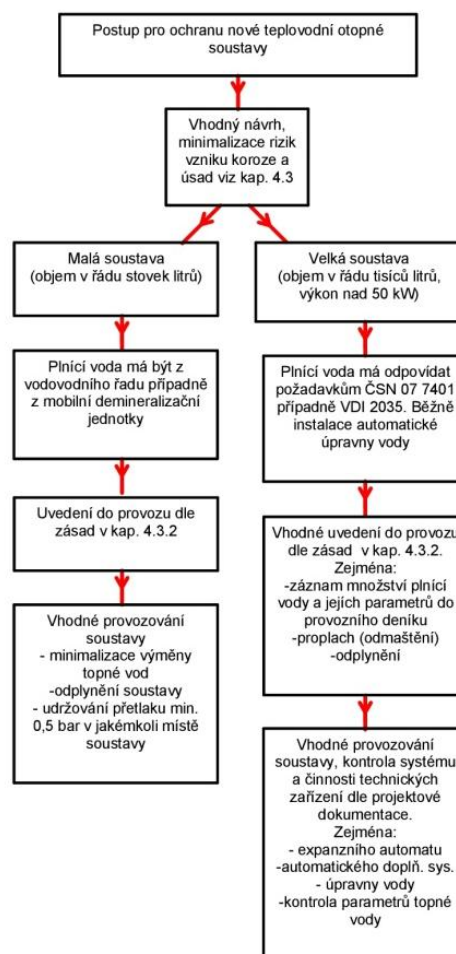
(v zaneseném/vyčištěném stavu) by se lišila pouze o desetiny procenta. To koresponduje s téměř shodným průběhem obou křivek v oblasti „úplně“ kondenzace (do teploty vratné vody 40°C) a predikuje opět téměř shodný průběh v oblasti bez kondenzace (když teplota vratné vody bude nad 55°C).

Z výsledků výpočtového modelu výměníku vyplývá, že vrstva nánosu musela být velmi slabá, pod 0,1 mm. O tom svědčí i poměrně mírný nárůst dispozičního tlaku čerpadla po vyčištění.

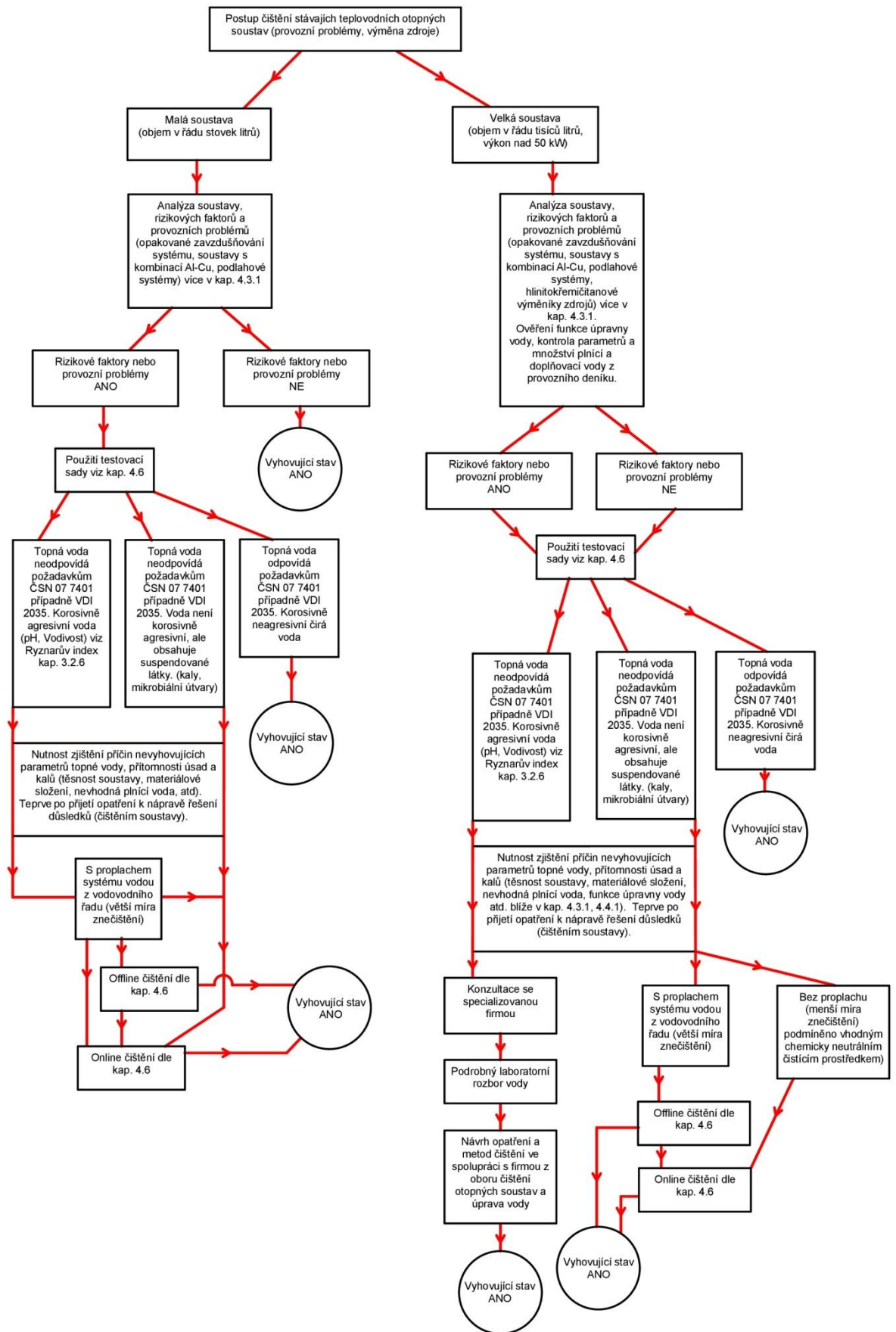
Při posuzování odůvodnitelnosti čištění výměníků v praxi je nutné si uvědomit, že závěry z měření lze jen obtížně zobecňovat. Pravděpodobná tloušťka nánosu na povrchu výměníku pod 0,1 mm v tomto případě způsobila pokles účinnosti o 0–2 % v rozmezí teplotních spádů (55/40–65/50). Rozhodně ale nelze říci, že úsada tl. 1 mm sníží účinnost o 19 %. Navíc parametrů, na kterých součinitel přestupu tepla záleží, je celá řada, přičemž množství z nich nelze v nestacionárním stavu počítat a jsou určeny na základě teorie podobnosti.

5.1 Návrhy opatření

Na základě poznatků z odborné literatury, norem, vlastních názorů autora, zkušeností pracovníků oborů vytápění a úpravy vod, se kterými jsem se během práce setkal, předkládám níže uvedené diagramy možných přístupů k ochraně a čištění teplovodních soustav.



Obr. 1.47 Diagram možného postupu pro prevenci a ochranu teplovodních otopných soustav



Obr. 1.48 Diagram možného postupu při čištění teplovodní otopné soustavy

6 Závěr

Cíl práce byl splněn. Práce obsahuje průřez teoretickým základem příčin vzniku, možností eliminace výskytu a odstraňování usazenin z otopné soustavy, především z teplosměnných ploch otopných těles a výměníků. Představuje metody chemického čištění vhodné pro teplovodní soustavy ústředního vytápění. Její součástí je přehled normativních předpisů, obecných projektových, technických a provozních doporučení s cílem vyvarovat se tvorbě usazenin a rizikům koroze. Během experimentu byl prokázán vliv úsad na účinnost zdroje v podobě plynového kondenzačního kotle.

V běžné praxi se teplovodní otopné soustavy s ústředním zdrojem tepla z důvodu energetických úspor obvykle nečistí. Čištění přichází na řadu až v případě problematické funkce systému (nedotápění některých otopných těles, neprůchodnost okruhů podlahového vytápění, cyklování zdrojů, korozní napadení systému nebo zvukové projevy proudění). Představu o tom, zda má z hlediska úspor energií význam čistit otopnou soustavu, si lze udělat při zohlednění provozních parametrů zdroje. Těmito indikátory mohou být:

- zvýšená Δt mezi přívodem a zpátečkou zdroje
- akustické projevy (mikrovary) ve zdroji
- vysoká teplota spalin
- nadměrný počet startů
- poruchové stavy přetopení
- nedotápění části otopné soustavy (snížení průtoku soustavou)

Často ovšem na potřebu čištění otopné soustavy dříve upozorní v odstavci výše zmíněné provozní problémy nebo poškození prvků soustavy. Je také nutné upozornit, že energetický přínos vlivem zvýšené „useful efficiency“ účinnosti zdrojů lze v případě běžných teplovodních otopných soustav očekávat zejména u zdrojů na plynná nebo kapalná paliva a především pak těch, které využívají latentního tepla spalin. V případě ostatních zdrojů bude úspora generována zejména zvýšením účinnosti soustavy a sezónní účinnosti zdroje kde se projeví vliv cyklického provozu a regulace systému.

U testovaného zdroje byla po chemickém vyčištění změřena vyšší účinnost o přibližně 2 % při teplotním spádu (60/45–65/50). Pokles tlakové ztráty zdroje byl změřen přibližně 10 %. Pokles tlakové ztráty zde mohl být částečně způsoben vyčištěním oběhového kola čerpadla během chemického čištění zdroje. Samozřejmě ideální by bylo provedení tohoto experimentu na více

zdrojích s různě zanesenými výměníky, ale na základě provedeného pokusu se zdrojem (s malým množstvím úsad) lze předpokládat, že v případě vyššího zanesení může být pokles účinnosti významně vyšší. Nicméně z naměřených výsledků (málo zaneseného výměníku) lze říci, že vliv úsad na účinnost zdroje a funkci soustavy je potvrzen.

Z naměřených výsledků rozdílu účinnosti přibližně 2 % nelze z energetického hlediska čištění otopných soustav obecně doporučit. Na druhou stranu si lze představit příklady aplikací, kde rozdíl účinností může být značně významnější (vyšší míra inkrustace výměníku, zahrnutí vlivu cyklování a usazenin v otopných tělesech). V takovém případě by bylo možné uvažovat o čištění jako o opatření s reálnou návratností. Prokázání této hypotézy nebylo potvrzeno ani vyvráceno.

Pro obecnou diskuzi o potenciálu čištění otopných soustav z energetického hlediska by bylo dále vhodné hodnotit vliv úsad na účinnost soustav více komplexně v souvislosti s druhem systému, typem zdroje a regulace. Nabízí se myšlenka měřit spotřebu tepla na vytápění reálného objektu v určitém časovém úseku (týden, měsíc, rok) v běžném provozu před a po čištění otopné soustavy. V takovém případě by bylo možné zahrnout vliv regulace, zvýšení spotřeby vlivem cyklického provozování zdroje a vliv úsad v otopných plochách, které zvyšují teplotu vratné vody. Tyto vlivy mohou mít zásadní energetický význam na účinnost otopné soustavy jako celku. Výše představeným způsobem by bylo možné lépe prokázat či vyvrátit ekonomický potenciál čištění otopných soustav ve smyslu úspory paliva.

Čištění otopných soustav rovněž má i další ekonomické, nicméně těžko vyčíslitelné přínosy. Tímto je míněna zejména ochrana soustavy a jejích prvků před korozí a úsadami viz poruchy v kap. 4.2. Nezanedbatelným efektem a často pro investora rozhodující motivací je ale zlepšení funkce a komfortu provozované soustavy. Především obnova funkce a eliminace nedotápění otopných těles, podlahových systémů nebo odstranění rušivých hluků proudění zúženými průřezy.

V neposlední řadě věřím, že tato práce prohloubila mé znalosti v oboru technického zařízení budov. Při jejím zpracování jsem načerpal řadu informací, které mě velmi obohatily, a s jejich pomocí jsem si vytvořil lepší povědomí o problematice fungování teplovodních otopných soustav.

Seznam zdrojů

A) vnitropodnikové materiály, statistiky, právní předpisy, normy, ověřené technologie, užité vzory a další institucionální zdroje

ČSN 07 7401. Voda a pára pro tepelná energetická zařízení s pracovním tlakem páry do 8 Mpa. Praha: ÚNMZ, listopad 1992.

ČSN EN 12828+A1. Tepelné soustavy v budovách - Navrhování teplovodních otopných soustav. Praha: ÚNMZ, listopad 2014.

ČSN EN 15502-1+A1. Kotle na plynná paliva pro ústřední vytápění - Část 1: Obecné požadavky a zkoušky. Praha: ÚNMZ, leden 2016.

ČSN EN 15502-2-1. Kotle na plynná paliva pro ústřední vytápění - Část 2-1: Zvláštní norma pro kotle provedení C a kotle provedení B2, B3 a B5, se jmenovitým tepelným příkonem nejvýše 1 000 kW. Praha: ÚNMZ, říjen 2013.

ČSN EN 305. Výměníky tepla - Definování výkonnosti výměníků tepla a všeobecné metody zkoušek pro stanovení výkonnosti výměníku tepla. Praha: ÚNMZ, květen 1998.

TNI 730331. Energetická náročnost budov – Typické hodnoty pro výpočet. Praha: ÚNMZ, duben 2013

VDI 2035 Blatt 1. Steinbildung in Trinkwassererwärmungs- und Warmwasser-Heizungsanlagen. Düsseldorf: VDI, Dezember 2005.

VDI 2035 Blatt 2. Wasserseitige Korrosion. Düsseldorf: VDI, August 2009.

B) knihy, kvalifikační práce

BAŠTA, Jiří. *Úprava vody pro otopné soustavy: seminář: sborník přednášek*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2002. 42 s. ISBN 80-02-01493-6.

BOTT, T. R. *Fouling of Heat Exchangers*. 1st Edition. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands, 1995. 546 s. ISBN 978-0-444-82186-7.

HORÁKOVÁ, Marta a kol. *Analytika vody*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2000. 283 s. ISBN 80-7080-391-6.

HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. 520 s. ISBN 978-80-7080-873-3.

JÍLEK, Miroslav. *Termomechanika*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2004, 168 s. ISBN 978-80-01-03107-0.

KAZI, S.N. *Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces*. In: MITROVIC, Jovan, ed. *Heat Exchangers – Basic Design Applications*. Publisher: InTech, 2012, s. 507–532. ISBN 978-953-51-0278-6.

KRÁL, Jaroslav. *Chemie vody: otázky a odpovědi: určeno pro posl. fak. stavební*. Praha: SNTL, 1985. 128 s.

ŠTIEGLER, Koloman. *Kotelní kámen vznik a odstraňování*. Žilina 1938. 97 s.

WÜNSCH, Josef, ed. *Technická příručka pro pracovníky oboru úprav vody*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1981. 778, [1] s.

ZÁBRANSKÁ, Jana a kol. *Laboratorní metody v technologii vody*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1997. [168] s. ISBN 80-7080-272-3.

C) odborné časopisecké články a studie ze sborníků

JELÍNEK, Vladimír. Zásady spalování paliv a vznik kondenzace. *Topenářství + instalace: Časopis pro vytápění, instalace, vzduchotechniku a ekologii* [online], 2003, č. 1 [cit. 18.12.2015]. ISSN 2336-4718. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=72526&di=7>

PANÁČEK, František. Možnosti použití fyzikálních úprav vody (FÚV) z hlediska chemického složení vody. *Topenářství + instalace: Časopis pro vytápění, instalace, vzduchotechniku a ekologii* [online], 2003, č. 1 [cit. 11.12.2016]. ISSN 2336-4718. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=72526&di=7>

D) jiné

ADAMOVSKEÝ, Daniel. Sdílení tepla. In: *Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra technických zařízení budov, předmět YATM* [online] 17.4.2011 [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/95-prepocet-spotreby-zemniho-plynu-na-kwh>

BAŠTA, Jiří. Provozní předpoklady kondenzačních kotlů In: *TBZ-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 23.1.2006 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3011-provozni-predpoklady-kondenzacnich-kotlu>

EBERL, Václav. *Smyčky výměníku. Řez zaneseným výměníkem*. Soukromý fotoarchiv

HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. Hydraulika potrubí. In: *Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra hydrauliky a hydrologie, předmět HYA2* [online]. 20.10.2015 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf

HORÁK, Jiří, HOPAN, František, KRPEC, Kamil, KUBESA, Petr, KOLONIČNÝ, Jan, OCHODEK, Tadeáš, HOLUBČÍK, M., JELUŠOVÁ, S. a Lubomír MARTINÍK. Stanovení účinnosti kotlů. In: *TBZ-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 21.4.2014 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>

HOŠA, Vladislav, *Školení 2016 – Vliv nečistot na provoz systému* [přednáška]. Vyškov: AV EQUEN, 11.5.2016

KREIBICH, Viktor, Jan STOULIL, *Čištění otopných a energetických zařízení* [přednáška]. Praha: FS ČVUT, 13.4.2016.

KRYCH, David. Dejte topení do čistírny. In: *TBZ-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 15.5.2014 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/11221-dejte-topeni-do-cistirny>

ŠPILÁČEK, Michal, ZÁRYBNICKÁ Michaela, FORTELNÝ, Zdeněk. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. In: *Fakulta strojní VUT v Brně*. [online]. 1.1.2011 [cit. 2016-9-11]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/007_Spalovaci-zarizeni-a-vymeniky-tepla---Spilacek---P1.pdf

VANĚK, Vladimír. Problematika plynů v otopných systémech I. In: *TBZ-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 11.8.2009 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5832-problematika-plynu-v-otopnych-systemech-i>

VAVŘIČKA, Roman. *Výpočet radiátoru*. In: *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online] [cit. 2016-8-11]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vavrirom/Pro%20I/vypocet.pdf>

VOSMÍK, Zdenek. Výskyt koroze a úsad při ohřevu vody ve výměnících tepla a jejich vliv na nerezovou ocel a provoz výměníku – 1. část. In: *Vosmik E&C Výměníky tepla* [online]. 15.1.2014 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-1.korozni-vlivy.pdf>

VOSMÍK, Zdenek. Výskyt koroze a úsad při ohřevu vody ve výměnících tepla a jejich vliv na nerezovou ocel a provoz výměníku – 2. část. In: *Vosmik E&C Výměníky tepla* [online]. 15.1.2014a [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: <http://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-2.vlivy-zanaseni.pdf>

(1) *Independens study shows sludge build-up significantly affects central heating system performance*, SENTINEL, 2010. Technický list.

(2) *Podklady školení*, AV EQUEN, 2016

(3) *Převodová tabulka mezi jednotkami tvrdosti* [online]. 2016 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.vodospol.cz/res/data/126/013750.pdf>

(4) *Jaká může být voda ?* [online]. agentura Mauri s.r.o. [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://www.ovodarenstvi.cz/clanky/jak-tvrda-muze-byt-voda>

(5) *Úpravny vody a filtrace* [online] Malvo s.r.o. [cit. 2016-12-25]. Dostupné z: <http://www.malvo.cz/upravny-vody-a-filtrace/>

(6) *Aqua Health Products* [online]. 2016 Aqua Health Products Inc. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.aquahealthproducts.com/understanding-ph-and-orp>

(7) *Chemistry lesson: calcium carbonate solubility*. [online] Lucky sci. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.luckysci.com/2015/09/chemistry-lesson-calcium-carbonate-solubility/>

(8) *Elektrochemická řada napětí kovů* [online] Olomoucký kraj. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2283>

- (9) *Electrical double layer* [online] Rusnano. [cit. 2016-11-20].
Dostupné z: <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article759>
- (10) *Heat transfer engineering* [online] researchgate [cit. 2016-11-15]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/225003558_fig3_Figure-3-Effect-of-temperature-on-various-fouling-mechanisms-at-constant-velocity
- (11) *Heat transfer engineering* [online] researchgate [cit. 2016-11-15]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/225003558_fig4_Figure-4-Effect-of-water-velocity-on-various-fouling-mechanisms-at-constant-temperature
- (12) *Katalogový list č. 03-Z1*, Vaillant Group Czech s.r.o., Technický list
- (13) *Změkčení vody* [online] EuroClean s.r.o. [cit. 2016-11-08].
Dostupné z: http://www.zmekceni-vody.cz/img/cms/aquasoftener_princip.jpg
- (14) *Demineralizační jednotka* [online] Av-equen s.r.o. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z:
<http://www.teplonosnekapaliny.cz/demineralizacni-jednotky/65-demineralizacni-jednotka-avdk-2300-comfort.html>
- (15) *Reflex výpočty* [online] Reflex CZ, s.r.o. [cit. 2016-12-28].
Dostupné z: www.reflexcz.cz/?download=tk/Reflex_vypocty_2016.pdf
- (16) *Testovací přístroje a sady* [online] Av-equen s.r.o. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z:
<http://www.teplonosnekapaliny.cz/home/51-merici-sada-avs-2000.html>
- (17) *Spalovací vlastnosti ZP (I)* [online] FÍK, Josef. [cit. 2016-12-27].
Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1963-spalovaci-vlastnosti-zp-i>
- (18) *Kvalita plynu*. [online] Gasnet s.r.o. [cit. 2016-12-26].
Dostupné z: <https://www.gasnet.cz/cs/kvalita-plynu/>
- (19) *Přepočet spotřeby zemního plynu na kWh*. [online] gasnet. [cit. 2016-12-26].
Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/95-prepocet-spotreby-zemniho-plynu-na-kwh>
- (20) *Orientační rozpočet čištění*. [cit. 2016-11-12] Unitherm-KV spol. s.r.o.

Seznam tabulek

Tab. 1.01 Převodní tabulka jednotek tvrdosti vody (3)	str.9
Tab. 1.02 Slovní hodnocení tvrdosti (4)	str.9
Tab. 1.03 Určení parametru alkality podle pH vzorku (Horáková,2000)	str.11
Tab. 1.04 Převodní tabulka užívaných jednotek konduktivity (Horáková, 2000)	str.12
Tab. 1.05 Interpretace hodnot Ryznarova indexu stability (Wünsch, 1981)	str.15
Tab. 1.06 Závislost $pK_2 - pK_S$ na teplotě (Wünsch, 1981)	str.16
Tab. 1.07 Absolutní drsnost povrchů vybraných materiálů (Havlíček et. Pícek, 2015)	str.22
Tab. 1.08 Požadavky na plnicí a otopnou vodu (ČSN 07 7401)	str.26
Tab. 1.09 Empirický způsob hodnocení rizika kotelního kamene dle VDI (VDI 2035-1)	str.27
Tab. 1.10 Výpočtový způsob hodnocení rizika kotelního kamene VDI (VDI 2035-1)	str.28
Tab. 1.11 Vyjádření váhového ekvivalentu pro některé látky (VDI 2035-2)	str.28
Tab. 1.12 Bezpečné parametry oběhové vody z hlediska koroze (VDI 2035-2)	str.29
Tab. 1.13 Tepelná vodivost vybraných materiálů (Vošmik, 2014, Bott, 2015)	str.42

Seznam obrázků

Obr. 1.01 Závislost rozpustnosti CaCO_3 na teplotě vody. (2)	str.8
Obr. 1.02 Orientační mapa tvrdosti vodu ve vodovodním řadu ČR. (5)	str.9
Obr. 1.03 Spektrum pH (6)	str.10
Obr. 1.04 Zastoupení forem CO_2 ve vodě v závislosti na pH (7)	str.14
Obr. 1.05 Rovnováha HCO_3^- a CO_2 (Bašta, 2002) (9)	str.15
Obr. 1.06 Standardní redoxní potenciál některých kovů (8)	str.17
Obr. 1.07 Zjednodušená představa dvojné vrstvy	str.18
Obr. 1.08 Schéma reakcí při elektrochemické koroze (Vosmik, 2014)	str.19
Obr. 1.09 Princip ukládání a odplavování úsad (Kazi, 2012)	str.21
Obr. 1.10 Vliv teploty povrchu na zanášení (10)	str.22
Obr. 1.11 Průběh tvorby úsad (Vosmik, 2014a)	str.23
Obr. 1.12 Fáze tvorby úsady v čase (Bott, 1995)	str.24
Obr. 1.13 Vliv rychlosti proudění na zanášení (11)	str.25
Obr. 1.14 Testovací okruh s výměníkem tepla (ČSN EN 15502-1)	str.31
Obr. 1.15 Schéma zdroje Vaillant UV INT 196/2-7-H (12)	str.35
Obr. 1.16 Grafické znázornění zkušební okruhu v měřicím softwaru počítače (autor)	str.35
Obr. 1.17 Grafické znázornění zkušební okruhu zdroje (autor)	str.37
Obr. 1.18 Zapojení zdroje v testovacím okruhu s odběrnou nádobou (autor)	str.38
Obr. 1.19 Připojení čistícího zařízení na soustavu (autor)	str.39
Obr. 1.20 Porovnání čisté a použité filtrační vložky (autor)	str.39
Obr. 1.21 Měření tepelné ztráty okruhu (autor)	str.40
Obr. 1.22 Smyčky výměníku (Václav Eberl, Vaillant Group Czech)	str.41
Obr. 1.23 Řez zaneseným výměníkem (Václav Eberl, Vaillant Group Czech)	str.41
Obr. 1.24 Průběh nárůstu úsad (Bott, 1995)	str.42
Obr. 1.24 Model nárůstu úsady tloušťky 0,5 mm na teplosměnné ploše (autor)	str.42
Obr. 1.25 Model nárůstu úsady tloušťky 0,1 mm na teplosměnné ploše (autor)	str.45
Obr. 1.26 Porovnání účinnosti „useful efficiency“ zdroje před a po čištění (autor)	str.46
Obr. 1.27 Rosný bod spalin zemního plynu (Jelínek, 2003)	str.47
Obr. 1.28 Znázornění průběhu teplot ve výměníku (Bašta, 2006)	str.47
Obr. 1.29 Proudění spalin výměníkem (Bašta, 2006)	str.47
Obr. 1.30 Typické provozní stavy plynového kondenzačního kotle (Bašta, 2006)	str.48
Obr. 1.31 Rozdíly teplot spalin a vratné vody zdroje (autor)	str.49
Obr. 1.32 Hydraulický odpor výměníku zdroje (autor)	str.50
Obr. 1.33 Vliv teploty zpátečky na účinnost typických pl. kondenzačních kotlů (Bašta, 2006)	str.51

Obr. 1.34 Vliv úsad na teplotní spád soustavy (autor)	str.52
Obr. 1.35 Pohled termokamerou na článkové otopné těleso před a po čištění (Krych, 2014)	str.53
Obr. 1.36 Úsady v otopném tělese (Krych, 2014)	str.53
Obr. 1.37 Prasklá spalovací komora kondenzačního plynového kotle (autor)	str.54
Obr. 1.38 Znečištěná topná voda v podlahovém systému vytápění (autor)	str.54
Obr. 1.39 Nečistoty v oběhovém kole čerpadla (autor)	str.54
Obr. 1.40 Schematický řez měničem iontů (13)	str.59
Obr. 1.41 Mobilní demineralizační jednotka (14)	str.59
Obr. 1.42 Závislost rozpustnosti plynů na tlaku (Vaněk, 2009)	str.60
Obr. 1.43 Příklad sestavy expanzního automatu se systémem odplynění a úpravou vody (15)	str.61
Obr. 1.44 Mobilní zkušební sada (16)	str.63
Obr. 1.45 Schéma čištění online metodou (autor)	str.65
Obr. 1.46 Schéma čištění offline metodou (autor)	str.66
Obr. 1.47 Diagram možného postupu pro a ochranu teplovodních otopných soustav	str.69
Obr. 1.48 Diagram možného postupu při čištění teplovodní otopné soustavy (autor)	str.70

Přílohy

Příloha 1: Výstup z měřícího softwaru, průběh teplot

Na následujících grafech je možné sledovat průběh teplot v desetiminutovém měřeném intervalu (úsek vyznačený svislými přímkami na vodorovné časové ose). Vodorovné čárkované osy označují požadovaný teplotní spád primárního okruhu.

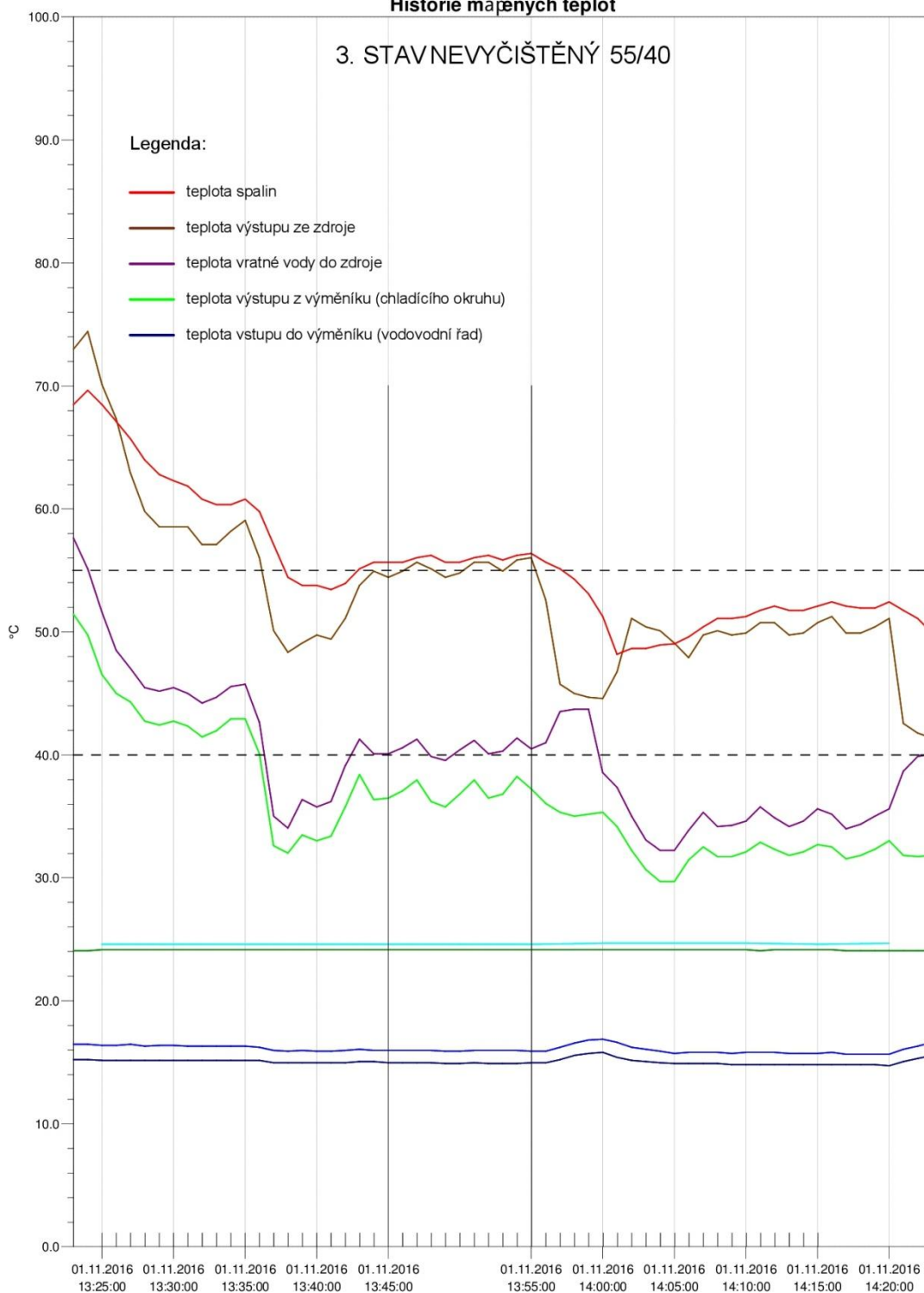
Na první dvojici grafů (vyčištěný/nevyčištěný) stav pro teplotní spád 55/40 není patrný téměř žádný rozdíl červeně označené teploty spalin.

Druhá dvojice grafů představuje (vyčištěný / nevyčištěný) stav pro teplotní spád 60/45. Zde je již patrná mírně nižší teplota spalin ve vyčištěném stavu. Rozdíl teplot spalin by v tomto případě byl pravděpodobně výraznější, bohužel při měření ve vyčištěném stavu došlo k mírně odlišnému nastavení teplotního spádu (do kotle se vracela teplejší voda viz rozdíl fialových průběhů) .

Třetí dvojice grafů značí (vyčištěný/nevyčištěný) stav) pro teplotní spád 65/50 zde je už výrazně patrný rozdíl teplot spalin.

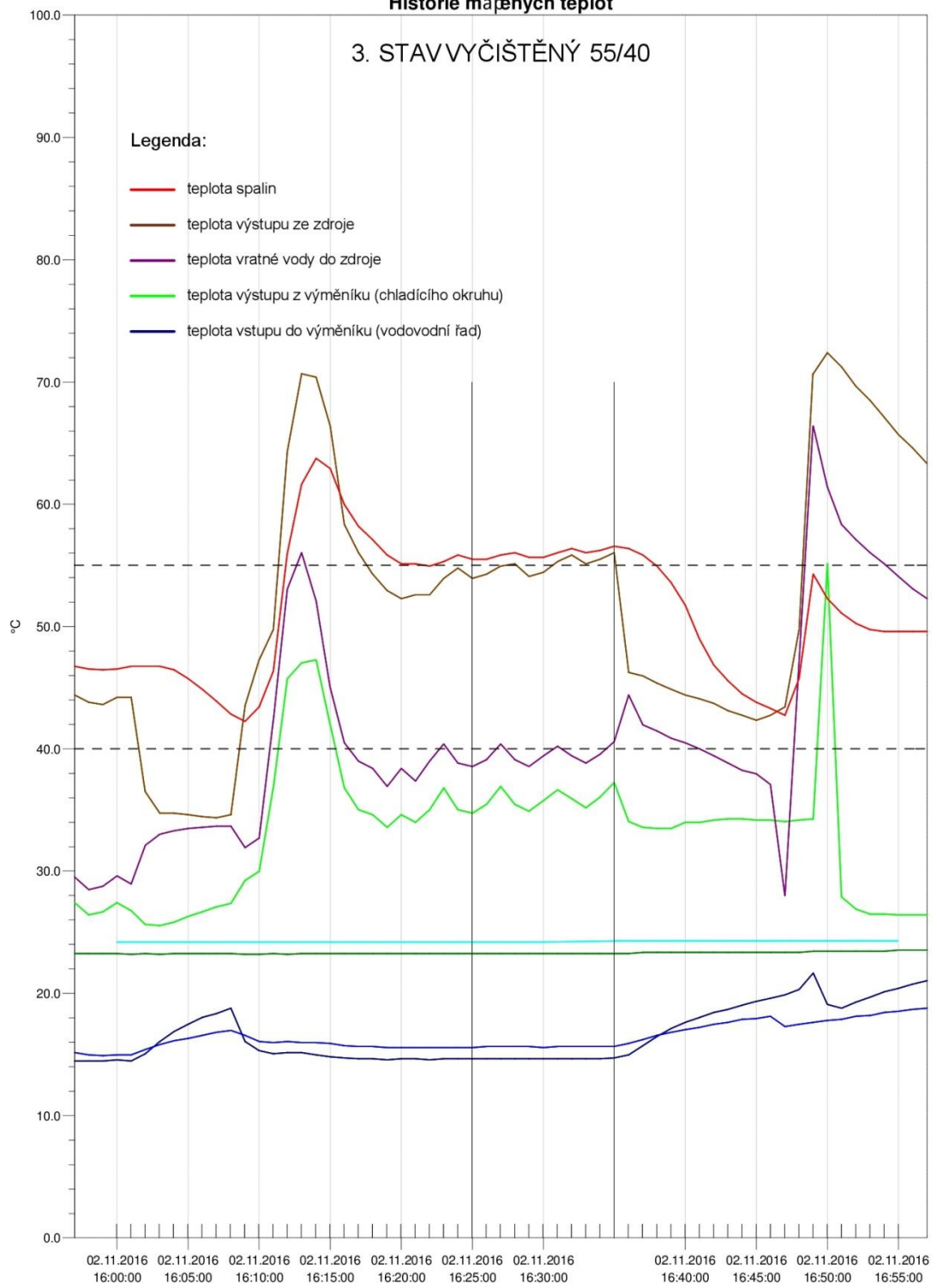
Historie měřených teplot

3. STAVNEVYČIŠTĚNÝ 55/40



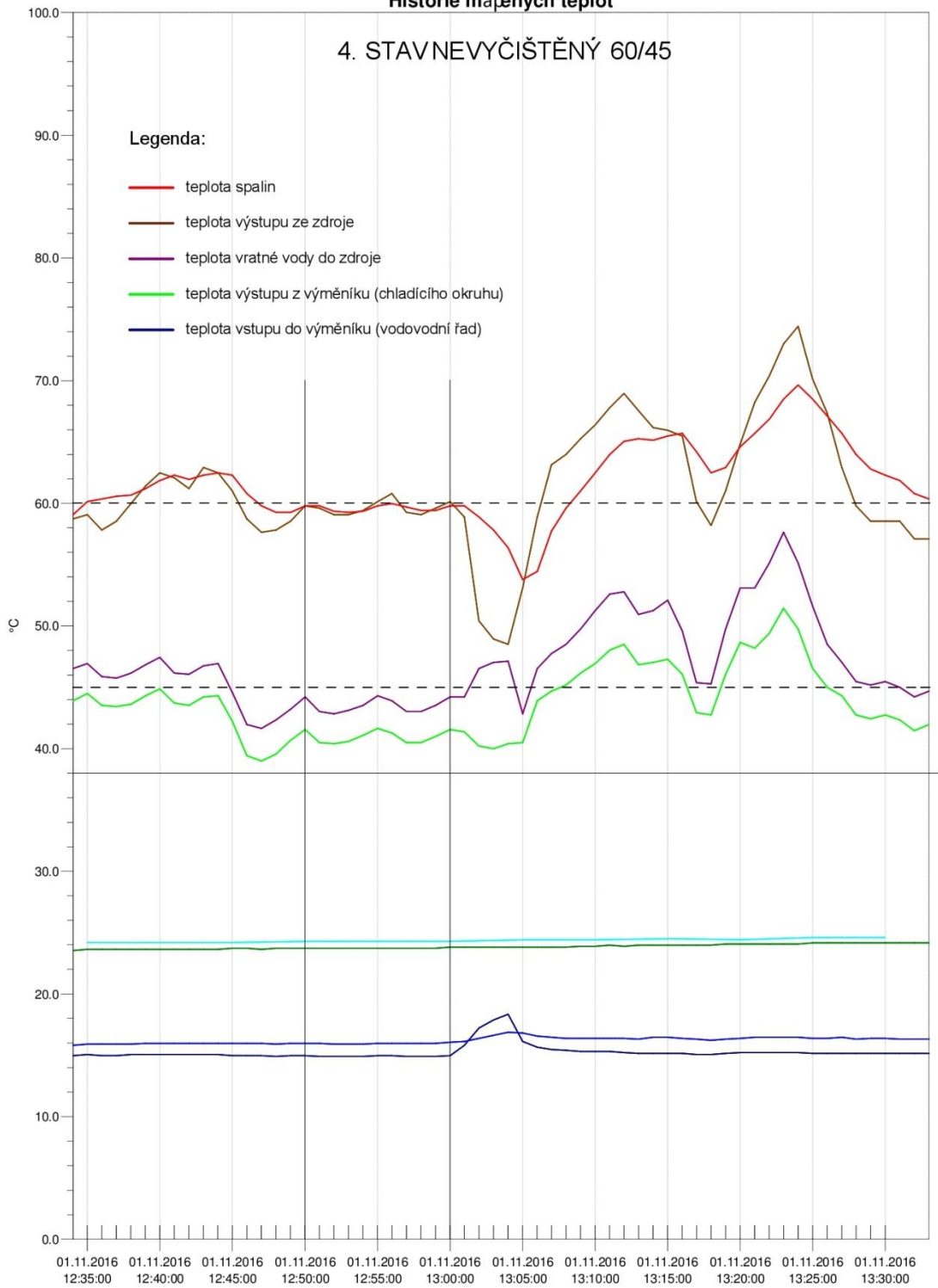
Historie měřených teplot

3. STAV VYČIŠTĚNÝ 55/40



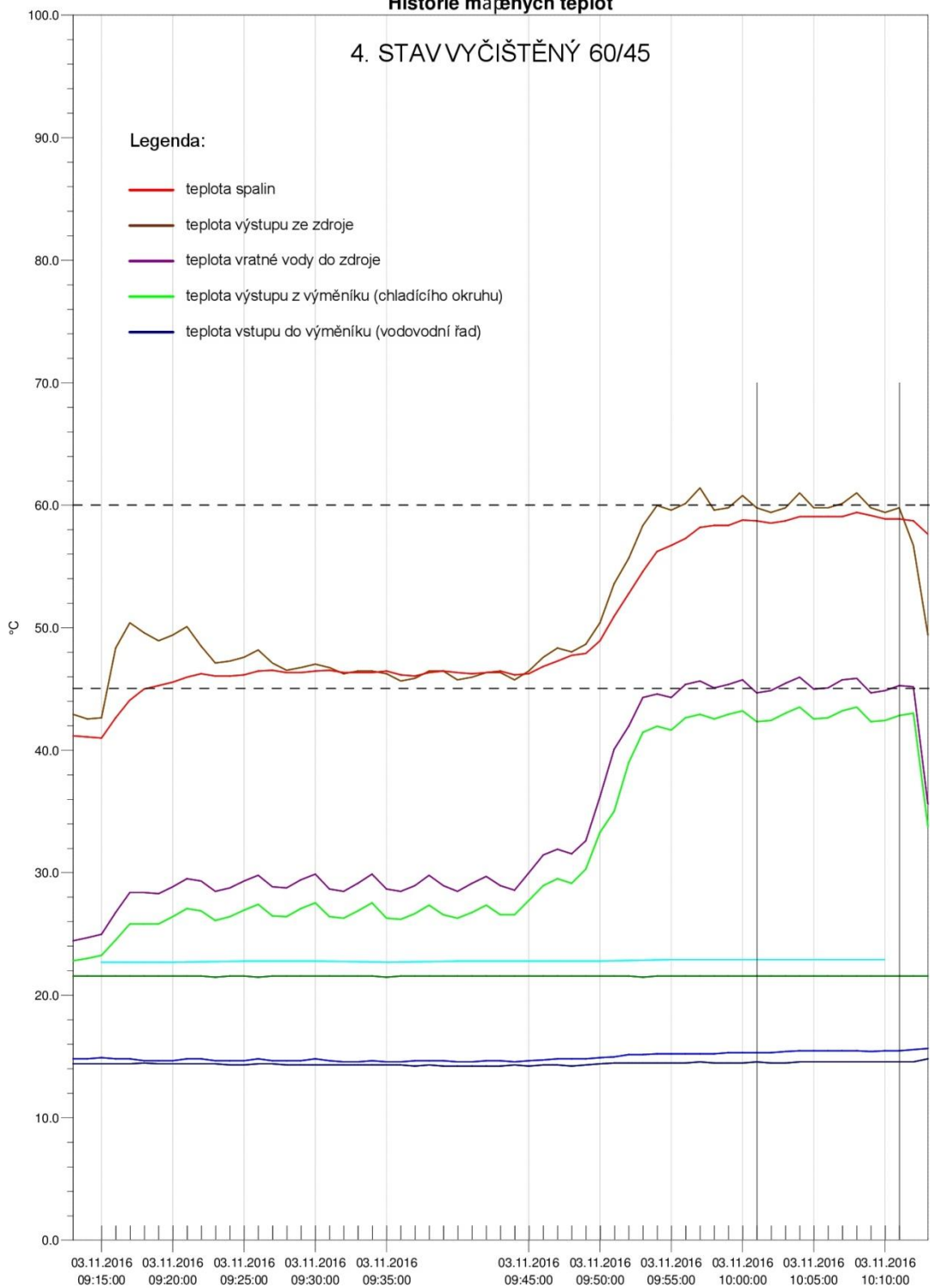
Historie měřených teplot

4. STAVNEVYČIŠTĚNÝ 60/45



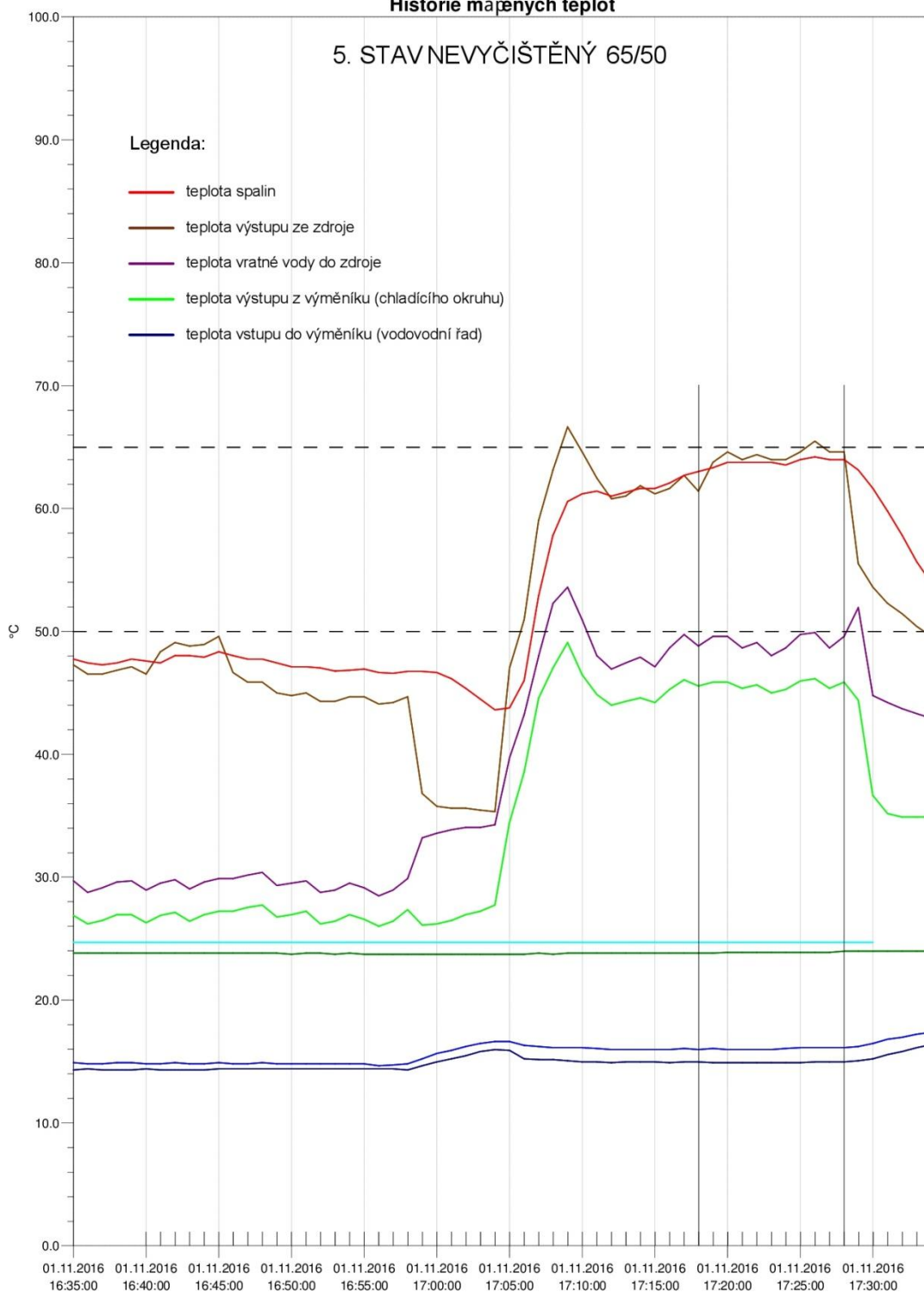
Historie měřených teplot

4. STAV VYČIŠTĚNÝ 60/45



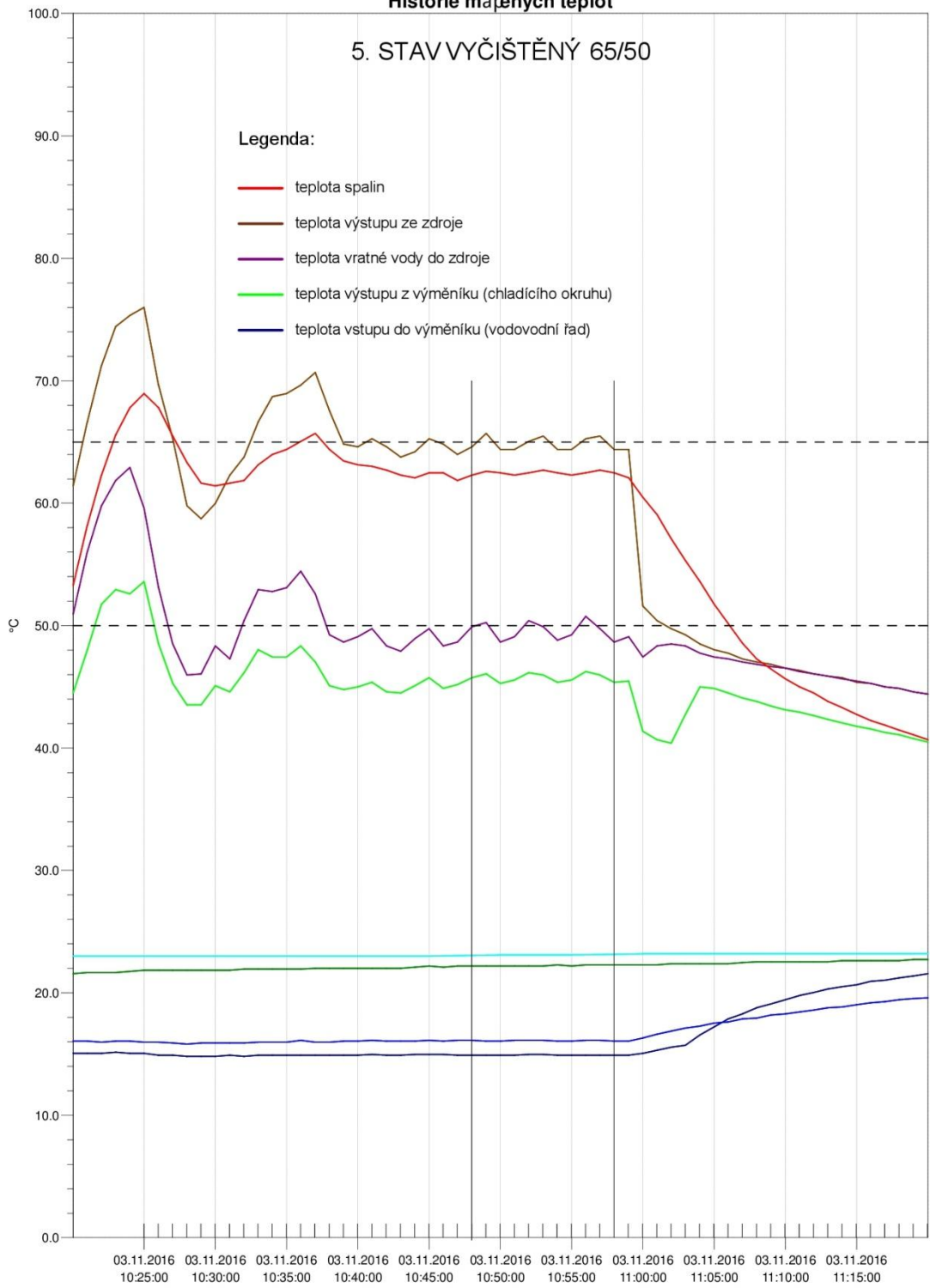
Historie měřených teplot

5. STAV NEVYČIŠTĚNÝ 65/50



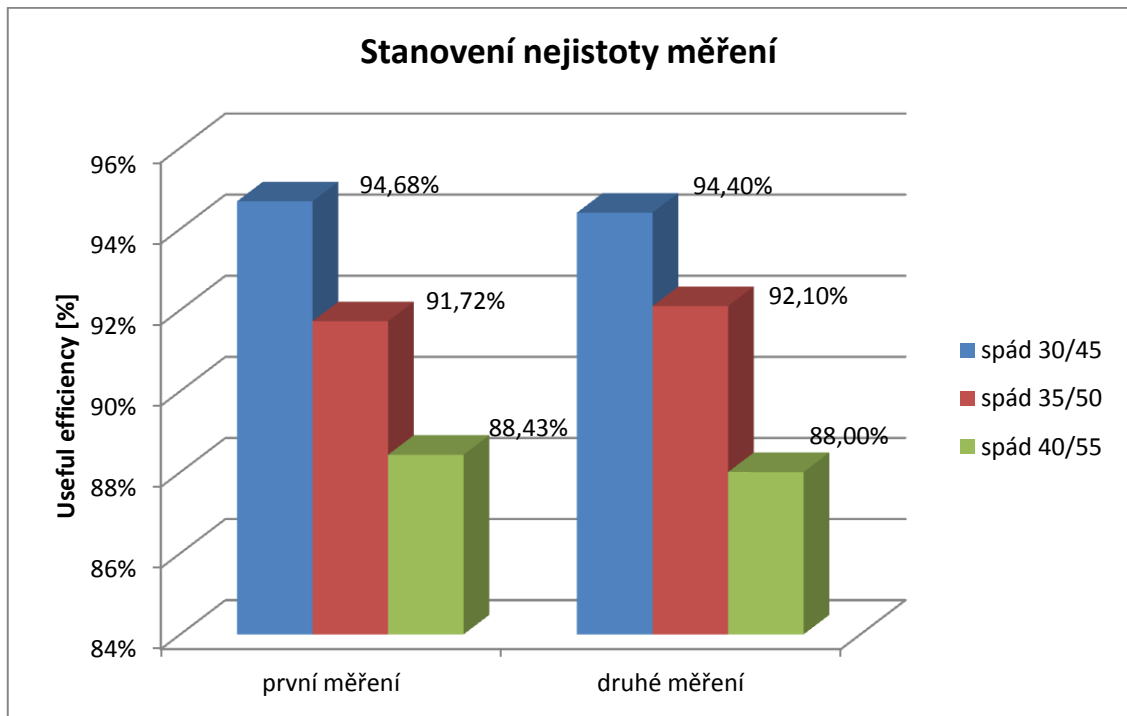
Historie měřených teplot

5. STAV VYČIŠTĚNÝ 65/50



Příloha 2: Odchylka měření

Pro zjištění odchylky měření byla některá měření při stejných teplotních spádech opakována. Opakovaným měřením byla zjištěna odchylka 0,28 – 0,62 %.



Příloha 3: Spotřeba energie na provoz čerpadla

Z výsledků tlakové ztráty výměníku zdroje změřených při experimentu byl stanoven průměrný příkon oběhového čerpadla na základě metodiky TNI 730331 a ČSN 15316-2-3. Modelový výpočet hodnotí úsporu energie na čerpací práce za předpokladu, že v okruhu nebo zdroji je instalováno čerpadlo s proměnnými otáčkami. Dále modelový příklad uvažuje celkovou tlakovou ztrátu okruhu 20 kPa při průtoku 680 kg/h (pro zjednodušení rovno 0,68 m³/h). Z porovnání hydraulického odporu výměníku zdroje před a po čištění lze určit, že tlaková ztráta výměníku se při průtoku 680 kg/h snížila o 4,3 kPa, viz graf 1.11. Tlaková ztráta okruhu s vyčištěným výměníkem je tedy uvažována 20 kPa, tlaková ztráta okruhu s úsadami ve výměníku 24,4 kPa.

Návrhový hydraulický výkon oběhového čerpadla $P_{H,hydr}$:

$$P_{H,hydr} = 0,2778 \cdot \Delta_{PH} \cdot V_H \quad [\text{W}]$$

$$P_{H,hydr(\text{před čištěním})} = 0,2778 \cdot 24,4 \cdot 0,68 = 4,61$$

$$P_{H,hydr(\text{po čištění})} = 0,2778 \cdot 20 \cdot 0,68 = 3,78$$

Upravený hydraulický výkon oběhového čerpadla $P_{H,Hydr,dis}$:

$$P_{H,Hydr,dis} = \frac{P_{H,hydr}}{1000} \cdot \beta_{H,dis} \cdot f_{H,S} \cdot f_{H,NET} \cdot f_{H,HB} \quad [\text{kW}]$$

$$P_{H,Hydr,dis(\text{před čištěním})} = \frac{4,61}{1000} \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,00184$$

$$P_{H,Hydr,dis(\text{po čištění})} = \frac{3,78}{1000} \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,00151$$

Korekční činitel využití čerpadla $f_{H,E}$:

$$f_{H,E} = \left(1,25 + \left(\frac{200}{P_{H,hydr}} \right)^{0,5} \right) \cdot 1,5 \cdot b \quad [-]$$

$$f_{H,E(\text{před čištěním})} = \left(1,25 + \left(\frac{200}{4,61} \right)^{0,5} \right) \cdot 1,5 \cdot b = (1,25 + 6,59) \cdot 1,5 \cdot 1 = 11,75$$

$$f_{H,E(\text{po čištění})} = \left(1,25 + \left(\frac{200}{3,78} \right)^{0,5} \right) \cdot 1,5 \cdot b = (1,25 + 7,27) \cdot 1,5 \cdot 1 = 12,79$$

Korekční činitel chodu oběhových čerpadel $e_{H,dis}$:

$$e_{H,dis} = f_{H,E} \cdot (C_{H,P1} + C_{H,P2} \cdot \beta_{H,dis}^{-1}) \quad [-]$$

$$e_{H,dis} \text{ (před čištěním)} = 11,75 \cdot (0,9 + 0,1 \cdot 0,4) = 15,28$$

$$e_{H,dis} \text{ (po čištění)} = 12,79 \cdot (0,9 + 0,1 \cdot 0,4) = 16,63$$

Průměrný elektrický příkon oběhového čerpadla $P_{aux H,p}$:

$$P_{aux H,p} = P_{H,hydr,dis} \cdot e_{H,dis} \quad [\text{kW}]$$

$$P_{aux H,p} \text{ (před čištěním)} = 0,00184 \cdot 15,28 = \mathbf{0,0281}$$

$$P_{aux H,p} \text{ (po čištění)} = 0,00151 \cdot 16,63 = \mathbf{0,0251}$$

Rozdíl průměrného příkonu oběhového čerpadla ($P_{aux H,p}$) před a po čištění je dle výpočtové metodiky byl 3 W. Při uvažování doby činnosti oběhového čerpadla dva tisíce hodin ročně by úsady na výměníku čerpadla způsobily nárůst spotřeby energie na čerpací práce o 12 %. Což ovšem v modelovém příkladu znamená nárůst spotřeby pouze o 6 kWh.

Značky a jednotky:

Δ_{PH} - návrhová tlaková ztráta otopné soustavy [kPa]

V_H - návrhový hydraulický průtok otopnou soustavou [m^3/h]

$\beta_{H,dis}$ - korekční činitel vyjadřující míru částečného zatížení = 0,4 [-]

$f_{H,S}$ - korekční činitel pro změnu teploty látky, ekvitermní regulace = 1 [-]

$f_{H,NET}$ - korekční činitel pro dvoutrubkovou soustavu = 1 [-]

$f_{H,HB}$ - korekční činitel hydraulické rovnováhy, vyvážená soustava = 1 [-]

b - součinitel pro nové budovy = 1 [-]

$C_{H,P1}$ - konstanta oběhového čerpadla s proměnnými otáčkami = 0,9 [-]

$C_{H,P2}$ - konstanta oběhového čerpadla s proměnnými otáčkami = 0,1 [-]

Příloha 4: Výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřním povrchu trubkového výměníku

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně α_{INT} výměníku je v modelovém příkladu stanoven na základě kritériálních rovnic níže. Model výměníku je zjednodušen, elipsovitý průřez kanálku je zjednodušen na průřez kruhový, dále jsou zanedbány změny směru proudění (smyčky) je tedy uvažováno přímé proudění.

Zdrojem použitých vzorců jsou:

- Aplikovaná termomechanika přednášky FSv ČVUT (ADAMOVSKEÝ, 2011) ,
- Podklady pro cvičení Spalovací zařízení a výměníky tepla FS VUT (ŠPILÁČEK, 2011)

Re – Reynoldsovo kritérium, vyjadřuje vliv třecích sil kapalin při proudění. Určuje charakter laminárního nebo turbulentního proudění.

Pr – Prantlovo kritérium, vyjadřuje míru podobnosti mezi rychlostním a teplotním polem.

Nu – Nussletovo číslo, poměr rychlosti přestupu tepla mezifázovou plochou ku rychlosti induktivního přenosu tepla.

$$\alpha_{INT} = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} \quad Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad Pr = \frac{\delta \cdot v \cdot cp}{\lambda}$$

$$Nu = \left(3,65 + \frac{0,0668 \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot D}{L} \right)^{\frac{2}{3}}}{0,045 \cdot \left(\frac{D}{L} \cdot Re \cdot Pr \right)^{\frac{1}{3}}} \right)$$

Rovnice platí pro laminární proudění $Re < 2320$, $10^{-1} < L/D$. $Re \cdot Pr < 10^4$

$$Nu = 0,116 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right)$$

Rovnice platí pro turbulentní proudění $2320 < Re < 10^6$, $0,6 < Pr < 500$, $1 < L/D < \infty$

Příklad výpočtu součinitele prostupu tepla je zde uveden pro tepelný spád 65/50. Vlivem změny rychlosti proudění ve zkušebním okruhu se mění při různých tepelných spádech i součinitel přestupu tepla, kompletní přehled výsledků je zobrazen v příloze č. 5.

Výpočet α_{INT} výměníku pro tepelný spád 65/50 ve stavu s úsadou 0,1 mm a bez úsad.

$$Re_{(s \text{ úsadami})} = \frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{1,381 \cdot 0,0098}{0,000643} \approx 21\,047 \text{ (turbulentní proudění)}$$

$$Re_{(bez \text{ úsad})} = \frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{1,326 \cdot 0,01}{0,000643} \approx 20\,622 \text{ (turbulentní proudění)}$$

$$Pr_{(s.ú.)} = \frac{\delta \cdot \nu \cdot cp}{\lambda} = \frac{970,4 \cdot 0,000643 \cdot 4,18}{0,652} \approx 4,00$$

$$Pr_{(b.ú.)} = \frac{\delta \cdot \nu \cdot cp}{\lambda} = \frac{970,4 \cdot 0,000643 \cdot 4,18}{0,652} \approx 4,00$$

$$Nu = 0,116 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right)$$

$$Nu_{s \text{ úsadami}} = 0,116 \left(21047^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot 4^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{0,0098}{12,56} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \approx 118,35$$

$$Nu_{(bez \text{ úsad})} = 0,116 \left(20622^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot 4^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{0,01}{12,56} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \approx 116,47$$

$$\alpha_{INT(s \text{ úsadami})} = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} = 118,35 \cdot \frac{0,652}{0,0098} \approx \mathbf{7874} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}\text{]}$$

$$\alpha_{INT(bez \text{ úsad})} = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} = 116,47 \cdot \frac{0,652}{0,01} \approx \mathbf{7594} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}\text{]}$$

Značky a jednotky:

λ - tepelná vodivost topné vody [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$]

l - charakteristický rozměr, světlost [m]

ν - kinematická viskozita topné vody [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

δ - hustota topné vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

cp - měrná tepelná kapacita vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

D - průtočný průměr [m]

L - charakteristický rozměr, délka [m]

Příloha 5: Přehled výsledků a naměřených hodnot z experimentu

Tab. 1/3 Naměřené hodnoty a výpočty pro stanovení účinnosti zdroje

Stav	Teplotní spád	Teplota intetriér - t6	Vlhkost	Teplota výstupu sekundární okruh - t4	Teplota spalin - t5	Teplota primárního okruhu na vstupu do kotle - t2	Teplota primárního okruhu výstupu z kotle - t1	Δt zpátečka kotle / spaliny	Teplota vodovodní řad - t3	Váha vody ve sběrné nádobě	Průtok topné vody primárním okruhem
	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg]	[kg/h]
před čištěním	45/30	25,67	39,81	25,99	47,00	29,22	44,56	15,33	14,41	174,88	900,00
po vyčištění	45/30	25,43	34,11	26,35	46,89	29,33	44,22	14,89	14,53	171,13	860,00
před čištěním	50/35	26,81	32,31	31,48	51,82	34,82	50,36	15,55	14,82	118,20	790,00
po vyčištění	50/35	25,14	29,75	31,03	51,45	34,00	49,36	15,36	14,50	119,44	790,00
před čištěním	55/40	26,27	28,88	34,61	55,45	39,82	56,09	16,27	14,91	95,70	680,00
po vyčištění	55/40	25,34	29,68	34,60	55,91	39,45	54,82	15,36	14,67	94,74	680,00
před čištěním	60/45	26,57	25,94	39,08	59,55	43,55	59,64	16,09	14,91	75,20	680,00
po vyčištění	60/45	23,59	24,31	40,72	59,00	45,27	60,00	14,73	14,50	70,56	750,00
před čištěním	65/50	26,38	29,94	44,64	63,82	49,36	64,18	14,82	14,91	60,60	750,00
po vyčištění	65/50	25,04	35,72	44,52	62,27	49,64	64,64	15,00	14,91	62,16	750,00

Tab. 2/3 Naměřené hodnoty a výpočty pro stanovení účinnosti zdroje

Stav	Teplotní spád	Součinitel prostupu tepla K_{vs} běžného metru potrubí	Rychlost proudění	Střední teplota	Kinematická viskozita	Re	Hustota topné vody	Vodivost topné vody	Pr
	[°C]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[m/s]	[°C]	[m ² .s ⁻¹]	[-]	[kg.m ⁻³]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[-]
před čištěním	45/30	1,359	1,657	36,89	8,08E-07	20099,3816	985,2	0,628	5,30
po vyčištění	45/30	1,367	1,521	36,78	8,08E-07	18821,9542	985,2	0,628	5,30
před čištěním	50/35	1,358	1,455	42,59	7,63E-07	18683,322	981,5	0,635	4,93
po vyčištění	50/35	1,367	1,397	41,68	7,63E-07	18309,6556	981,5	0,635	4,93
před čištěním	55/40	1,357	1,252	47,95	7,21E-07	17018,6534	977,8	0,641	4,60
po vyčištění	55/40	1,366	1,203	47,14	7,21E-07	16678,2804	977,8	0,641	4,60
před čištěním	60/45	1,358	1,252	51,59	6,81E-07	18018,2807	974,1	0,646	4,29
po vyčištění	60/45	1,367	1,326	52,64	6,81E-07	19475,6416	974,1	0,646	4,29
před čištěním	65/50	1,359	1,381	56,77	6,43E-07	21047,5639	970,4	0,652	4,00
po vyčištění	65/50	1,367	1,326	57,14	6,43E-07	20626,6126	970,4	0,652	4,00

Tab. 3/3 Naměřené hodnoty a výpočty pro stanovení účinnosti zdroje 3/3

Stav	Teplotní spád	Nu - turbulentní proudění	α_{EXT} - součinitel přestupu tepla na vnější straně	α_{INT} - součinitel přestupu tepla na vnitřní straně	Množství tepla na výstupu ze zdroje $Q = m \cdot c \cdot (t_4 - t_3)$	Tepelná ztráta okruhu zdroje	Výhřevnost spotřebovaného množství zemního plynu	Useful efficiency	Změna účinnosti zdroje
	[°C]	[-]	[W.m ⁻² .k ⁻¹]	[W.m ⁻² .k ⁻¹]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[%]	[%]
před čištěním	45/30	125,27	36,50	8027,5	8507,8	15,35	8998,83	94,71%	
po vyčištění	45/30	118,83	36,50	7462,3	8498,5	15,52	8998,83	94,61%	-0,10%
před čištěním	50/35	115,30	36,50	7470,8	8268,6	21,60	8998,83	92,13%	
po vyčištění	50/35	113,43	36,50	7203,1	8292,8	22,63	8998,83	92,41%	0,28%
před čištěním	55/40	104,38	36,50	6827,6	7916,3	29,67	8998,83	88,30%	
po vyčištění	55/40	102,67	36,50	6581,4	7930,3	29,83	8998,83	88,46%	0,16%
před čištěním	60/45	106,90	36,50	7046,8	7632,2	34,23	8998,83	85,19%	
po vyčištění	60/45	113,87	36,50	7355,9	7770,3	39,75	8998,83	86,79%	1,60%
před čištěním	65/50	118,35	36,50	7874,0	7568,1	41,58	8998,83	84,56%	
po vyčištění	65/50	116,47	36,50	7593,9	7731,4	43,92	8998,83	86,40%	1,84%

Příloha 6: Výpočet výhřevnosti plynu

Zemní plyn může mít různé vlastnosti podle místa svého původu (Ruský, Norský, Alžírský atd..). Ve výpočtu je použita typická hodnota výhřevnosti pro Tranzitní plyn, která je porovnaná s protokolem sledování kvality zemního plynu ze stanice Praha Háje 1.

Potenciál energie v zemním plynu charakterizuje výhřevnost nebo spalné teplo rozdíl mezi nimi je možné definovat takto:

Spalné teplo zemního plynu - Hs

„Je množství tepla, uvolněné úplným spálením 1 m³ zemního plynu při tlaku 101 325 Pa v adiabatických podmínkách, za předpokladu, že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách, je v kapalném stavu.“ (17)

Výhřevnost - Hi

„Je množství tepla, uvolněné úplným spálením 1 m³ zemního plynu při tlaku 101 325 Pa v adiabatických podmínkách, za předpokladu, že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách, zůstane v plynném stavu.“ (17)

Obecně lze v České republice uvažovat tyto hodnoty Tranzitního zemního plynu:

Spalné teplo -Hs 10,478 kWh.m⁻³

Výhřevnost - Hi 9,445 kWh.m⁻³

O tom že tyto hodnoty jsou použitelné protokol z měření kvality zemního plynu pro listopad 2016 (doba prováděného experimentu).

Tab. Průměrné naměřené hodnoty v uzlovém bodu Chrom - Háje 1 pro listopad 2016

metan	[mol%]	96,717	N2	[mol%]	0,542
etan	[mol%]	2,131	kyslík	[ppm]	< 1
propan	[mol%]	0,266	celk. síra	[mg/m ³]	< 1
iso-butan	[mol%]	0,052	hutnota - d	[-]	0,574
n-butan	[mol%]	0,040	hustota	[kg/m ³]	0,704
iso-pentan	[mol%]	0,008	Wobbého index - Ws	[kWh/m ³]	14,063
n-pentan	[mol%]	0,005	rosný bod	[°C]	< -18
C6+	[mol%]	0,013	rosný bod při 3,92MPa	[°C]	< -18
CO2	[mol%]	0,227	HCDP 27 Bar	[°C]	-9,1

podmínky měření t1/t2 [°C]: 15/15

Zdroj: (18)

Pomocí lze u Wobbeho indexu (W_s) a hustoty (d) z tabulky lze podočítat spalné teplo dosazením do vztahu:

$$H_s = W_s \cdot \sqrt{d} = 14,063 \cdot \sqrt{0,504} = 10,655 \quad [kWh \cdot m^{-3}] \quad (17)$$

Z porovnání obvykle uvažovaných hodnot tranzitního plynu ($H_s = 10,478$) a vypočtených parametrů plynu v období listopad ($H_s = 10,655$) je zřejmý minimální rozdíl. Pro další výpočty bude dále použita obvykle uvažovaná hodnota Tranzitního plynu $H_s = 10478 [kWh \cdot m^{-3}]$.

Z výše uvedených definic vyplývá, že jednotky výhřevnosti a spalného tepla jsou vztaženy k běžnému atmosférickému tlaku (101, 325 kPa a teplotě 15°C). Pro přesné měření je třeba zohlednit i vliv tlaku v plynovodu (nízkotlaký rozvod do 5 kPa), skutečný atmosférický tlak podle nadmořské výšky místa odběru a teplotu dopravovaného plynu.

Tuto korekci lze vyjádřit takto:

$$k = \frac{T_v}{T_p} \cdot \frac{\Delta P_b + \Delta P_p}{P_v} \cdot \frac{z_v}{z_p} = \frac{288,15}{298,15} \cdot \frac{97,1 + 2,0}{101,325} \cdot 1 = 0,9452 \quad [-] \quad (19)$$

k - přepočtový objemový koeficient plynu, který by byl naměřen za standartních podmínek

T_v - vztažná teplota plynu (při které byla vyjádřena výhřevnost / spalné teplo obvykle 15 °C)

T_p - provozní teplota plynu před plynoměrem (uvažována shodná s teplotou interiéru 25 °C)

ΔP_b - barometrický tlak podle nadmořské výšky Chrást'any 400 m.n.m (97, 100 kPa)

ΔP_p - přetlak zemního plynu před plynoměrem (2 kPa)

ΔP_v - vztažný tlak zemního plynu (101,325 kPa)

$\frac{z_v}{z_p}$ - kompresiabilní faktor pro přetlaky do 100 kPa se uvažuje = 1

Množství skutečně dodané energie lze následně vyjádřit ze vztahu:

$$Q_s = V_p \cdot k \cdot H_s \cdot 3600 \quad [\text{KJ}] \quad (19)$$

Po dosazení je tedy možné určit výhřevnost spotřebovaného množství zemního plynu:

$$Q_s = V_p \cdot k \cdot H_s \cdot 3600 = 0,28 \cdot 0,9452 \cdot 10,478 \cdot 3600 = 9983 \quad [\text{KJ}]$$

$$Q_v = V_p \cdot k \cdot H_i \cdot 3600 = 0,28 \cdot 0,9452 \cdot 9,445 \cdot 3600 = \mathbf{8999} \quad [\text{KJ}]$$

Q_s - skutečné množství dodané energie v případě uvažování spalného tepla [KJ]

Q_v - skutečné množství dodané energie v případě uvažování výhřevnosti [KJ]

V_p – spotřeba zemního plynu změřená na plynoměru, za 10 minutový cyklus to bylo 0,280 [m³]

H_s – splané teplo zemního plynu při standartních podmínkách [kWh.m⁻³]

Výpočtová metodika pro stanovení účinnosti zdroje dle použité normy ČSN EN 15502 -2 -1 + A1 vychází z výhřevnosti zemního plynu (H_i).

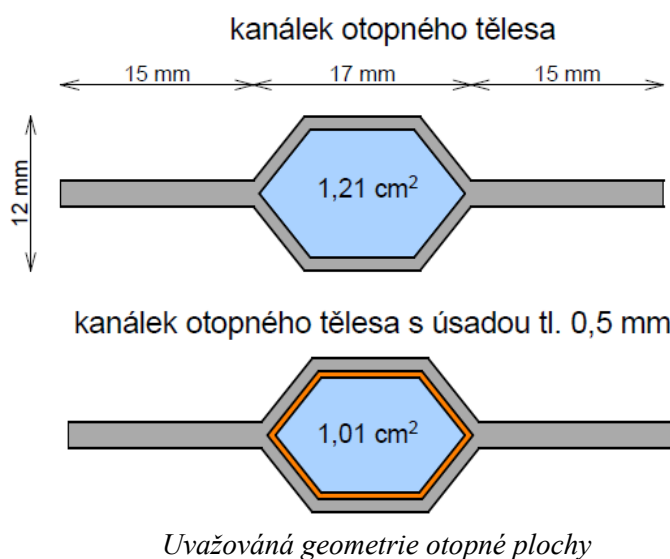
Příloha 7: Výpočet výkonu otopného tělesa

Uvažuji přibližně otopné těleso Radik Klasik 600/1000 typ 20 teplotní spád 65/50. Dle podkladů výrobce má jeho výkon při teplotě interiéru 20 °C být 664 W. Ve výpočtu je provedeno několik zjednodušení:

- geometrie tvaru tělesa nevychází z výkresové dokumentace, ale z proměření skutečného stavu a empirické odhadu
- výpočet součinitele prostupu tepla kanálku vychází z rovnice pro rovinnou stěnu, přesněji by měl být uvažován ekvivalentní součinitele prostupu tepla šestiúhelníkového (elipsovitého) průřezu kanálku
- kvůli zohlednění úsady je uvažována jako přestupní plocha vnitřní plocha kanálků, jako teplosměnná plocha tedy není uvažována nosná deska mezi kanálky
- ve výpočtovém stavu je uvažována úsada tl. 0,5 mm rovnoměrně rozložená po celé vnitřní ploše, což je v reálně rovněž velmi nepravděpodobné.

Výše zmíněná zjednodušení jsou důvodem rozdílu mezi údaji výrobce a vypočtenými hodnotami. Pro účel orientačního procentuálního vyjádření rozdílu výkonu čistého / zaneseného otopného tělesa je, ale model považován za dostatečný. Zejména při zvážení „reálnosti“ rovnoměrně rozložené úsady.

Úsada tloušťky 0,5 mm na vnitřním povrchu otopného tělesa dle výpočtu viz dále způsobuje pokles výkonu o **8,3 %**.



Vzorce a postup výpočtu byl převzat ze studijních podkladů doktora Vavříčky (2011)

$$m_w = \frac{Q_p}{c_p \cdot (t_{w1} - t_{w2})} = \frac{664}{4186 \cdot (65 - 50)} = 0,01057 \quad [kg/s]$$

$$V = \frac{m_w}{\delta_w} = \frac{0,01057}{985} = 0,00001074 \quad [m^3/s]$$

$$w = \frac{V}{S_{pr}} = \frac{0,00001074}{0,000121} = 0,001431 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$d_h = \frac{4 \cdot A_w}{O} = \frac{4 \cdot 0,000121}{0,0416} = 0,01163 \quad [m]$$

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} = \frac{0,001431 \cdot 0,01163}{0,000000808} = 20,60 \quad [-]$$

$$Pr = \frac{v \cdot \delta \cdot c_p}{a} = \frac{0,000000808 \cdot 985 \cdot 4186}{0,652} = 5,11 \quad [-]$$

$$Nu = \frac{\alpha_w \cdot d_h}{\lambda_w} = 1,62 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \right) = 1,62 \cdot \left(20,60 \cdot 5,11 \cdot \frac{0,01163}{0,6} \right)^{1/3} = 2,055 \quad [-]$$

$$\alpha_{INT} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_h} = \frac{2,055 \cdot 0,652}{0,0113} = 115,19 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot k^{-1}]$$

$$\alpha_K = 1,6 \cdot (t_{st} - t_L)^{0,33} = 1,6 \cdot (57,5 - 20)^{0,33} = 5,29 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot k^{-1}]$$

$$\alpha_S = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot c_0 \cdot \left(\left(\frac{T_{st}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_L}{100} \right)^4 \right)}{(t_{st} - t_L)} = \frac{0,92 \cdot 0,92 \cdot 5,67 \cdot \left(\left(\frac{57,5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right)}{(57,5 - 20)}$$

$$= 5,84 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot k^{-1}]$$

$$\alpha_{EXT} = \alpha_S + \alpha_K = 5,84 + 5,29 = 11,13$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{INT}} + \frac{t_{ls}}{\lambda_s} + \frac{t_{lu}}{\lambda_u} + \frac{1}{\alpha_{EXT}}} = \frac{1}{\frac{1}{115,19} + \frac{0,001}{50} + \frac{0}{0,7} + \frac{1}{11,13}} = 10,145$$

$$Q = k \cdot S_k \cdot (t_{st} - t_L) = 10,145 \cdot 1,55 \cdot (57,5 - 20) = \mathbf{589 \text{ W}}$$

Použití vzorce a postup výpočtu výše byl demonstrován pro nezanesený stav, přehled výpočtu a porovnání s výkonem otopného tělesa s úsadami je možný v následujících tabulkách.

Tab. Výpočet výkonu tělesa bez úsad

Q _p	požadovaný výkon	664	[W]	t _{lS}	tloušťka stěny	0,001	[m]
t _{w1}	teplota přívod	65	[°C]	t _{lU}	tloušťka úsady	0	[m]
t _{w2}	teplota zpátečka	50	[°C]	λ _s	vodivost stěny	50	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{st}	střední teplota	57,5	[°C]	λ _ú	vodivost úsady	0,7	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{INT}	teplota v místnosti	20	[°C]	ε ₁	emisivita stěn	0,92	[-]
m _w	potřebný průtok	38,06975633	[kg/h]	ε ₂	emisivita otopného tělesa	0,92	[-]
V	objemový průtok	1,0736E-05	[m ³ /s]	c _o	Sfanova-Boltzmannova konstanta	5,76	[W.m ⁻² .k ⁻⁴]
S _{pr}	průřez kanálku int.	0,000121	[m ²]	Re	Reynoldsovo číslo	20,606535	[-]
p _k	počet kanálků	62	[ks.]	Pr	Prantlovo číslo	5,1097449	[-]
O	obvod kanálku	0,0416	[m]	Nu	Nusleho číslo	2,0551807	[-]
w	rychlost v kanálku	0,001431081	[m/s]	α _{INT}	součinitel přestupu tepla vnitřní	115,17165	[-]
d _h	hydraulický průměr	0,011634615	[m]	α _{EXT}	součinitel přestupu tepla vnější	11,128375	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
δ _w	hustota vody	985	[kg/m ³]	α _S	součinitel přestupu tepla sáláním	5,8372225	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
v	kinematická viz.	0,000000808	[m ² .s ⁻¹]	α _K	součinitel přestupu tepla konvekcí	5,2911528	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
S _k	plocha tělesa	1,54752	[m ²]	k	součinitel prostupu tepla	10,145788	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
a	vodivost vody	0,652	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]	Q	výkon tělesa	589	[W]

Tab. Výpočet výkonu tělesa s úsadami tl. 0,5 mm

Q _p	požadovaný výkon	664	[W]	t _{lS}	tloušťka stěny	0,001	[m]
t _{w1}	teplota přívod	65	[°C]	t _{lU}	tloušťka úsady	0,0005	[m]
t _{w2}	teplota zpátečka	50	[°C]	λ _s	vodivost stěny	50	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{st}	střední teplota	57,5	[°C]	λ _ú	Vodivost úsady	0,7	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{INT}	teplota v místnosti	20	[°C]	ε ₁	emisivita stěn	0,92	[-]
m _w	potřebný průtok	38,06975633	[kg/h]	ε ₂	emisivita otopného tělesa	0,92	[-]
V	objemový průtok	1,0736E-05	[m ³ /s]	c _o	Sfanova-Boltzmannova konstanta	5,76	[W.m ⁻² .k ⁻⁴]
S _{pr}	průřez kanálku int..	0,000101	[m ²]	Re	Reynoldsovo číslo	22,464147	[-]
p _k	počet kanálků	62	[ks.]	Pr	Prantlovo číslo	5,1097449	[-]
O	obvod kanálku	0,03816	[m]	Nu	Nusleho číslo	2,0496765	[-]
w	rychlost v kanálku	0,001714464	[m/s]	α _{INT}	součinitel přestupu tepla vnitřní	126,22922	[-]
d _h	hydraulický průměr	0,010587002	[m]	α _{EXT}	součinitel přestupu tepla vnější	11,128375	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
δ _w	hustota vody	985	[kg/m ³]	α _S	součinitel přestupu tepla sáláním	5,8372225	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
v	kinematická vizkoz.	0,000000808	[m ² .s ⁻¹]	α _K	součinitel přestupu tepla konvekcí	5,2911528	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
S _k	plocha tělesa	1,419552	[m ²]	k	součinitel prostupu tepla	10,150557	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
a	vodivost vody	0,652	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]	Q	výkon tělesa	540	[W]

Tab. Výpočet výkonu tělesa s úsadami kdy v 1/3 tělesa není průtok

Q _p	požadovaný výkon	664	[W]	t _{lS}	tloušťka stěny	0,001	[m]
t _{w1}	teplota přívod	65	[°C]	t _{lU}	tloušťka úsady	0	[m]
t _{w2}	teplota zpátečka	50	[°C]	λ _s	vodivost stěny	50	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{st}	střední teplota	57,5	[°C]	λ _ú	vodivost inkrustu	0,7	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]
t _{int}	teplota v místnosti	20	[°C]	ε ₁	emisivita stěn	0,92	[-]
m _w	potřebný průtok	38,06975633	[kg/h]	ε ₂	emisivita otopného tělesa	0,92	[-]
V	objemový průtok	1,0736E-05	[m ³ /s]	c _o	Sfanova-Boltzmannova	5,76	[W.m ⁻² .k ⁻⁴]
S _{pr}	průřez kanálku	0,000121	[m ²]	Re	Reynoldsovo číslo	31,161102	[-]
p _k	počet kanálků	41	[ks.]	Pr	Prantlovo číslo	5,1097449	[-]
O	obvod kanálku	0,0416	[m]	Nu	Nusleho číslo	2,358953	[-]
w	rychlost v kanálku	0,002164074	[m/s]	α _{INT}	součinitel přestupu tepla vnitřní	132,19495	[-]
d _h	hydraulický průměr	0,011634615	[m]	α _{EXT}	součinitel přestupu tepla vnější	11,128375	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
δ _w	hustota vody	985	[kg/m ³]	α _S	součinitel přestupu tepla sáláním	5,8372225	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
v	kinematická viz.	0,000000808	[m ² .s ⁻¹]	α _K	součinitel přestupu tepla	5,2911528	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
S _k	plocha tělesa	1,02336	[m ²]	k	součinitel prostupu tepla	10,262203	[W.m ⁻² .k ⁻¹]
a	vodivost vody	0,652	[W.m ⁻¹ .k ⁻¹]	Q	výkon tělesa	394	[W]