Experimentální provoz funkčního vzorku výměníku tepla v reálných podmínkách kanalizace

Doc. Ing. David Stránský, PhD., Dr. Ing. Ivana Kabelková, Ing. Vojtěch Bareš, PhD., Mgr. Gabriela Šťastná, PhD.
ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Ing. Miloš Jelínek, CSc.
ATEKO, a.s.

1. Úvod

Jedním ze zdrojů energie pro tepelná čerpadla může být i odpadní voda. Tepelnou energii z odpadní vody lze získávat přímo v jednotlivých nemovitostech, v kanalizaci nebo na odtoku z ČOV (DWA – M114, 2009). Okrajovými podmínkami jsou jednak dostatečný průtok a maximální přípustná změna teploty odpadní vody, jednak vhodné umístění dostatečně velkých spotřebitelů energie, které podmiňuje ekonomičnost řešení.

Využívání energie z odpadní vody jednotlivých nemovitostí je hospodárné zejména pro větší provozy (např. nemocnice) nebo provozy s velkou spotřebou teplé vody. Získávání energie na odtoku ČOV je vzhledem ke zpravidla značným vzdálenostem potenciálních uživatelů vhodné spíše pro potřeby ČOV. Perspektivní je proto využívání energie z odpadní vody v kanalizaci, ležící blízko potenciálních uživatelů. Výměníky tepla mohou být umístěny přímo ve stokách nebo ve vedlejší trati (v bypassu). Výměníky ve vedlejší trati jsou nezávislé na provozu kanalizace a její geometrii a jsou lépe přístupné pro údržbu, jsou ale investičně náročnější, protože je nutno vybudovat bypass a odpadní vodu je nutno čerpat. Výměníky v hlavní trati jednotné stokové sítě mohou tedy často být výhodnějším řešením. Vzhledem k náročnější údržbě však může docházet k významnému poklesu účinnosti přenosu tepla (až o 50-60%) v důsledku zarůstání teplosměnné plochy výměníku biofilmem a pokrytí sedimentem (Bott, 1995; Characklis, 1981; Wanner, 2004).

Proto vznikl výzkumný projekt Získávání tepelné energie z odpadní vody v kanalizačních sítích (TA03020600), který se zabývá třemi hlavními aspekty získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci:

1. Vytvořením metodického postupu pro začlenění využití tepelné energie odpadní vody do generelů odvodnění,
2. Vývojem ekonomicky rentabilního tepelného výměníku pro prostředí kanalizačních sítí (řešení používaná v zahraničí jsou často ekonomicky nákladná); typ výměníku má následně částečný vliv na specifikaci kritérií vhodnosti instalace výměníku do jednotlivých stok a na optimální způsob údržby výměníku,
3. Zkoumáním optimálního způsobu provozu a údržby výměníku, tak aby nedocházelo k významnému snižování jeho dlouhodobé účinnosti.

Vývoj tepelného výměníku a určení teoretického potenciálu pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci jsou popsány v Stránský a kol., 2014a a Stránský a kol., 2014b.

Tento článek se zabývá experimentálním provozem funkčních vzorků výměníku tepla instalovaných ve stokové síti v pilotním povodí. Hlavní pozornost je zaměřena na sledování vývoje účinnosti přenosu tepla a vlivu čištění teplosměnné plochy.

2. Vyvíjený výměník tepla

Konstrukční řešení výměníku

Navržený výměník je deskového typu a je tvořen články z nerezové oceli zapojenými do série. Délka článků je 1800 mm (z důvodu ztížené manipulace v omezeném prostoru stokové sítě), šířka 250 mm (z důvodu možnosti aplikace nejen v průchodných, ale i v průlezných stokách) a výška 30 mm (z důvodu co nejmenšího narušení proudění a snížení hydraulické kapacity stoky) (Obr. 1). Tok oběhového média uvnitř každého článku usměrňují vnitřní přepážky, které jsou uspořádány vystřídaným způsobem a tvoří 35 tahů.

Jednotlivé články jsou vzájemně propojeny pomocí pružných hadicových propojek, které umožňují určitou vůli v přesnosti instalace výměníku ve stokové síti a rovněž instalaci nejen v rovných, ale i v zakřivených úsecích stokové sítě. Články jsou kotveny ke stěně kanalizačního potrubí pomocí patek. Hrany a spoje modulů jsou zakryty nerezovými kusy ve tvaru „U“, které zajišťují hladký přechod mezi jednotlivými moduly výměníku, aby bylo zabráněno zachytávání pevných látek unášených kanalizací. Stejně tak náběhová hrana (proti proudu) je upravena nerezovým krytem.

Ohřáté oběhové médium se vrací tlakovou hadicí z PE po vnější hraně výměníku. Jako teplonosná kapalina může být použita voda; v případě funkčních vzorků, kdy je nutno vzniklé teplo mařit (viz dále), byla použita bezglykolová kapalina PECASOL 2000 Solan. Jedná o kapalinu netoxickou a neekotoxickou, nehořlavou a biologicky lehce odbouratelnou, jejíž případné vypuštění do kanalizace je povoleno.

Obr. 1. Články tepelného výměníku

Instalace funkčních vzorků v kanalizaci

Pilotním povodím projektu je Hradec Králové. Jako místa instalace funkčních vzorků výměníku byla na základě monitoringu a vyhodnocení potenciálu získávání tepelné energie a souhlasu provozovatele stokové sítě vybrána 2 místa s odlišnými hydraulickými

podmínkami – profil „Farářství“ na spojených kmenových stokách B a D (průměrné tečné napětí za bezdeštného stavu 0,8 N/m^2) a profil „Nemocnice“ na kmenové stoce C (průměrné tečné napětí za bezdeštného stavu 3 N/m^2).

V obou místech instalace jsou umístěny paralelně dva funkční vzorky výměníku tepla o ploše cca 2 m^2 (5 článků) (Obr. 2). Při testování způsobů čištění je levá větev čištěna, pravá (při pohledu po proudu) nikoliv a slouží jako reference.

Tepelné výkony jedné větve výměníku se při daných provozních podmínkách pohybují v rozmezí cca 1,10-1,35 kW, v referenčním stavu až 1,5 kW.

Obr. 2. Instalace tepelného výměníku ve stoce

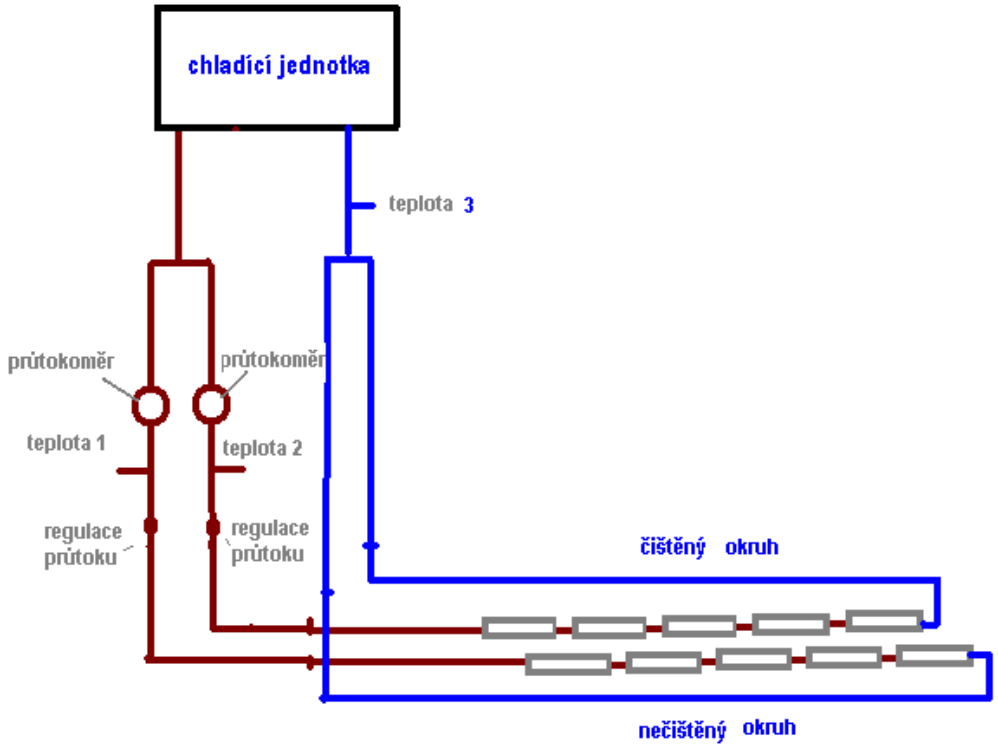
Zařízení pro maření tepla

Při provozu funkčních vzorků je nutno mařit vzniklé teplo. Pro chlazení byl prováděn nejprve výběr mezi komerčně vyráběnými tepelnými čerpadly. Ta se však pro účely pilotního provozu neukázala být vhodná, a proto byl další výběr směrován na chladicí jednotky. Nejlépe vyhovovala chladicí jednotka od firmy JDK typu WDE s akumulační nádrží.

Chladicí jednotka byla opatřena přístřeškem proti povětrnostním vlivům a připojena k dočasné přípojce elektrické energie. Následně na ni bylo napojeno tlakové potrubí vyvedené na povrch.

Systém monitoringu

Schéma monitoringu pro sledování účinnosti tepelných výměníků je uvedeno na Obr. 3.



Obr. 3. Schéma zapojení výměníků a chladicího okruhu s vyznačenými místy měření a měřenými veličinami (modrá větev přivádí vodu do výměníku, červená ji odvádí)

Teploty:

- t_{ov} teplota odpadní vody v profilu instalace,
- teplota 3 teplota teplonosné kapaliny při vstupu do výměníků,
- teplota 2 teplota teplonosné kapaliny při výstupu z výměníků pro čištěný okruh,
- teplota 1 teplota teplonosné kapaliny při výstupu z výměníků pro nečištěný okruh,
- t_{ext} venkovní teplota na povrchu (měřeno u chladicí jednotky JDK).

Všechny teploty jsou měřeny teplotními čidly Pt100 od výrobce Fiedler, která jsou přes převodník napojena na registrační jednotku. Interval odečítání hodnot je 1 min, data jsou přenášena pomocí GSM.

Pro měření teploty v odpadní vodě je čidlo opatřeno chráničkou z nerezového plechu, aby se zabránilo jeho poškození plovoucími nečistotami nebo při manipulaci v rámci instalace. Pro měření teplot v okruhu výměníku je čidlo umístěno v armaturním dílu určeném pro měření teploty.

Průtoky:

- Q_{ov} průtok odpadní vody v příslušném profilu
- q_1 průtok teplonosné kapaliny pro čištěný okruh
- q_2 průtok teplonosné kapaliny pro nečištěný okruh

Průtok v kanalizačním potrubí je měřen přístrojem Sigma 950 od výrobce Hach v profilu Farářství a přístrojem výrobce Nivus v profilu Fakultní nemocnice. Jedná se o přístroj měřící výšku hladiny (pomocí ultrazvuku či bubbleru) a rychlost proudění (ultrazvukově).

Průtoky q_1 a q_2 v okruzích s teplonosnou kapalinou jsou měřeny mechanicky lopatkovými vodoměry Flodis, přičemž jsou regulovány na stejnou hodnotu (z důvodu porovnatelnosti výkonu čištěné a nečištěné větve). Hodnoty jsou zaznamenávány v l/s s časovým intervalem 1 min (q_1 a q_2), resp. 3 min (Q_{ov}).

3. Analýza možných způsobů čištění výměníku

Níže je uveden rozbor vhodnosti různých metod čištění pro odstraňování biofilmu a sedimentů z povrchu výměníků v pilotním povodí:

- *Vysokotlaké čištění tryskami* (recyklační vozy) - vzhledem k vysokým používaným tlakům při čištění (125-250 barů, nejčastěji 170-175 barů) hrozí riziko místní deformace plechu výměníku. Dalším rizikem je možnost poškození trysek a jejich přívodních hadic o hrany výměníku. Z těchto důvodů v pilotním povodí tato metoda pro čištění výměníků použita nebyla a ani se její používání neplánuje.
- *Proplachování stok odpadní vodou* - nad výměníkem by bylo nutno ve stoce vzdout odpadní vodu a následným otevřením hradicího zařízení vytvořit v kanalizaci vlnu, která by měla odstranit znečištění z povrchu výměníku. Z technických způsobů připadá v úvahu zadržení vody pomocí nafukovacích vaků, které jsou vyráběny pro potrubí až do rozměrů 2200 mm, nicméně jejich použití vyžaduje manipulaci přímo v potrubí a při rychlém uvolnění odpadní vody nahromaděné za vakem vzniká riziko ztráty vaku i ohrožení zdraví technika. Zadržení odpadní vody lze tedy provést pouze pomocí stavítka, ovládaného z prostoru mimo kanalizační potrubí. Vzhledem k tomu, že se jedná o instalaci vyžadující zásadní stavební zásahy do kanalizačního potrubí, bylo od zkoumání tohoto způsobu v pilotním povodí upuštěno.
- *Čištěním nárazovým oplachem vodou z hydrantu nebo cisterny* - požární hydranty dle ČSN 73 0873 umožňují odběr vody 4-7,5 l/s (rodinné domy do zastavěné plochy 200 m^2 a nevýrobní objekty do plochy 120 m^2). U objektů s vysokým požárním rizikem a plochou nad 2500 m^2 pak je možná kapacita hydrantu až 25-40 l/s, jedná se však o výjimečné případy, které zpravidla nebudou dostupné v místě instalace výměníku. V případě pilotních instalací funkčního vzorku, kde jsou průtoky 61 l/s („Nemocnice“), resp. 123 l/s („Farářství“), by při daných sklonových poměrech vyvolalo zaústění 40 l/s zvýšení rychlostí proudění pouze z 0,65 na 0,75 m/s („Nemocnice“), resp. z 0,42 na 0,46 m/s („Farářství“). Proto se od způsobu čištění pomocí požární vody z hydrantu ustoupilo.

  Cisternové vozy umožňují zpravidla nízkotlaký průtok 2000–3000 l/min (tj. cca 30-50 l/s), tj. obdobné hodnoty jako vysokokapacitní požární hydranty. Vzhledem k obsahu běžných cisteren do 12 m^3, by zvýšená rychlost byla navíc vyvolána jen po velmi krátkou dobu (cca 5 min). Cisterny jsou proto pro účely čištění výměníků na pilotních aplikacích taktéž nevhodné.
- *Ruční nízkotlaké čištění tryskami* – bylo vyzkoušeno, ale docházelo ke vzniku aerosolu, následně tedy nebylo aplikováno.
- *Ruční mechanické čištění* – vhodné v závislosti na použitých nástrojích; v pilotním povodí bylo vyzkoušeno čištění výměníků rýžovým kartáčem, které se ukázalo být nejvhodnějším způsobem.

- K erozi biofilmu dochází rovněž *za zvýšených průtoků* v kanalizaci způsobených *dešťovými událostmi* - v pilotním povodí byla provedena analýza četnosti samočištění výměníků v místech instalace pomocí simulačního srážkoodtokového modelu, přičemž výsledky ukazují, že v letních měsících (06-08) bude k samočištění docházet, v zimních nikoliv; nicméně toto je nutno ještě ověřit při provozu, až se budou vyskytovat výraznější srážkové události.

4. Sledování vývoje účinnosti výměníků a vlivu čištění

Čištění výměníku

Čištění levých větví funkčních vzorků bylo prováděno v cca 14 denních intervalech.

Množství biofilmu

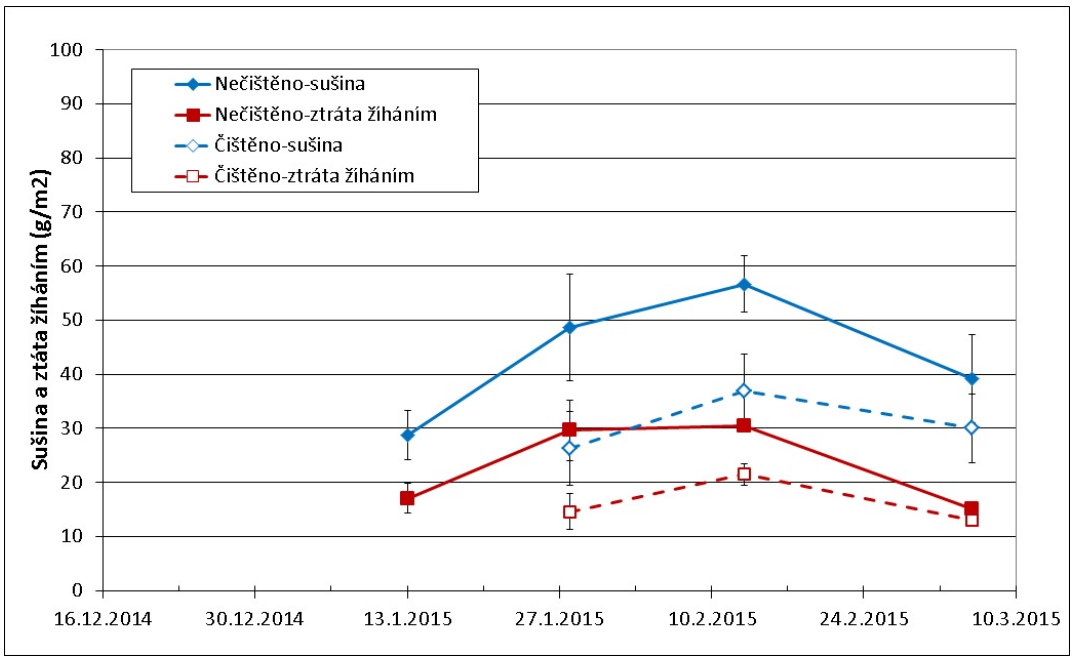
Před čištěním byly na nečištěných i na čištěných místech výměníku odebírány vzorky biofilmu (Obr. 4).

Obr. 4. Biofilm na plechu výměníku

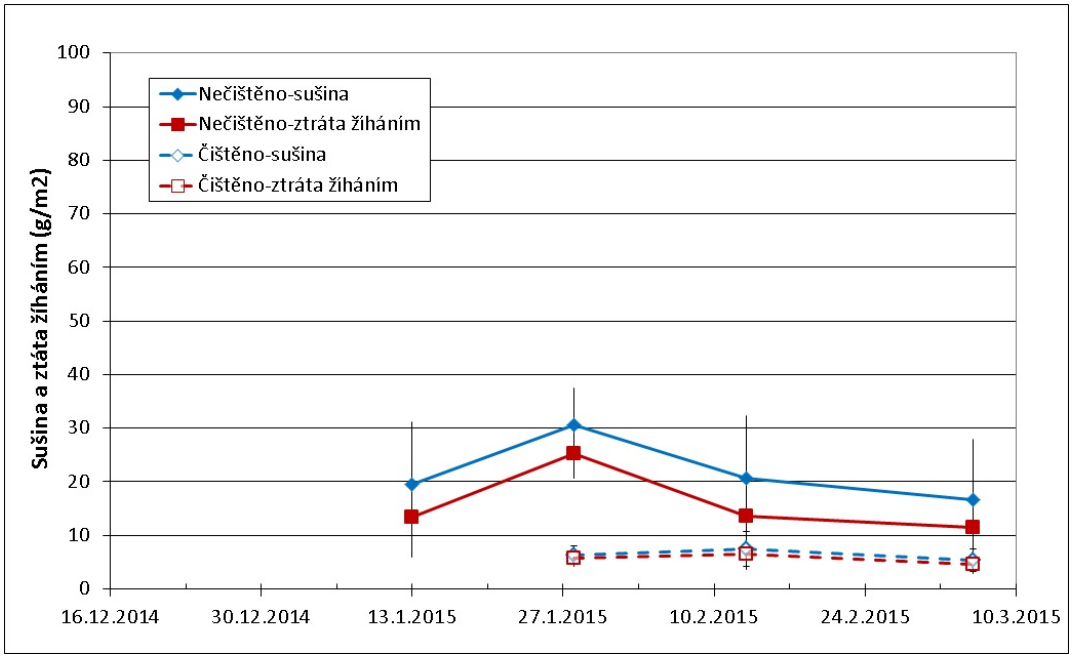
V profilu „Farářství“ (Obr. 5) se díky velmi nízkému tečnému napětí v místě instalace výměníku (0,8 N/m^2) udržovalo na výměníku poměrně vysoké množství biofilmu a sedimentů (organický podíl na čištěných i nečištěných plochách byl 52%), které bylo ve sledovaném období čištěním sníženo v průměru jen na cca 65% (sušina průměrně z 48,19±7,11 g/m^2 na 31,08±4,42 g/m^2, ztráta žíháním průměrně z 25,03±7,07 g/m^2 na 16,36±3,71 g/m^2). K obnovení původního množství biofilmu a sedimentů tedy docházelo velmi rychle, během několika dní.

V profilu „Nemocnice“ (Obr. 6) je vzhledem k vyššímu tečnému napětí (3 N/m^2) v místě instalace výměník pokryt menším množstvím biofilmu a sedimentů. Účinnost čištění byla z časového hlediska podstatně vyšší, protože zde se díky čištění množství sušiny udržovalo na cca 25% a množství biofilmu na cca 34% hodnoty nečištěných ploch (sušina poklesla

z 25,65±5,85 g/m^2 na 6,37±0,88 g/m^2, ztráta žíháním se snížila z 16,71±6,08 g/m^2 na 5,62±0,83 g/m^2). Organický podíl nečištěných ploch byl 77%, čištěných ploch 88%.



Obr. 5. Vývoj sušiny a množství biofilmu na čištěných a nečištěných plochách výměníku v profilu „Farářství“



Obr. 6. Vývoj sušiny a množství biofilmu na čištěných a nečištěných plochách výměníku v profilu „Nemocnice“

Přestup tepla

Koeficient přestupu tepla k ($kW.m^{-2}.K^{-1}$) je vyjádřen jako:

$k = W / (A. LMTD)$

kde W je výkon v kW
A je plocha výměníku v m^2
LMTD je střední logaritmický rozdíl teplot v K

Pokles účinnosti přenosu tepla v důsledku zarůstáním biofilmem lze popsat pomocí tzv. fouling faktoru f ($kW.m^{-2}.K^{-1}$), který je vyjádřen následovně:

$1/f = 1/k – 1/k_0$

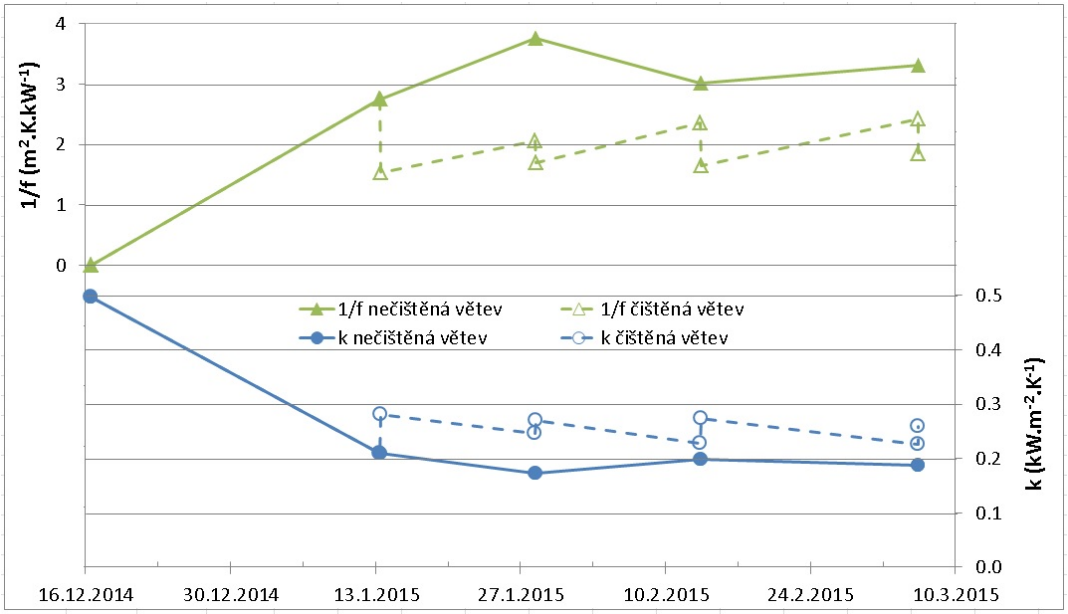
kde k_0 je původní hodnota koeficientu přestupu tepla k (tj. bezprostředně po instalaci), která je nadále brána jako referenční, protože se jednalo o čistý, nezanesený výměník,

k je aktuální hodnota koeficientu přestupu tepla.

V Tab. 1 a na Obr. 7 jsou pro lokalitu „Farářství“ shrnuty hodnoty koeficientu přestupu tepla a fouling faktoru pro různé fáze monitoringu pro nečištěnou pravou větev výměníku a před a po čištění levé větve. Hodnoty jsou normalizovány tak, aby byly srovnatelné s referenčním stavem. Fouling faktor dosahuje až 3,75 $m^2.K\ kW^{-1}$, což koresponduje s Wanner (2004), který uvádí hodnoty 0 až 5 $m^2.K\ kW^{-1}$podle intervalu čištění a místních podmínek z hlediska tvorby biofilmu.

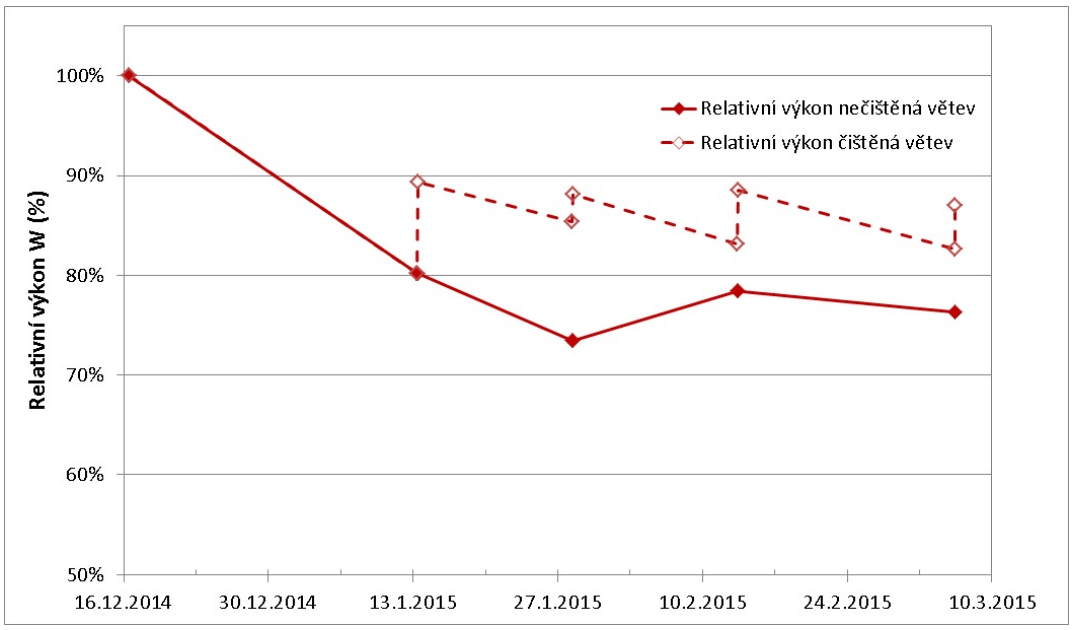
Tab. 1. Vliv čištění výměníku na koeficient přestupu tepla a fouling faktor v lokalitě „Farářství“

Pořadí a datum čištění		Výkon W [kW]		Koeficient přestupu tepla k [$kW.m^{-2}.K^{-1}$]		1/f [$m^2.K\ kW^{-1}$]	
		Nečištěná větev	Čištěná větev	Nečištěná větev	Čištěná větev	Nečištěná větev	Čištěná větev
reference	16.12.2014	1,500		0,497			
1.čištění	13.01.2015	1,203	1,203	0,210	0,210	2,759	2,759
		1,203	1,341	0,210	0,282	2,759	1,539
2.čištění	28.01.2015	1,102	1,280	0,173	0,245	3,752	2,064
		1,102	1,322	0,173	0,269	3,752	1,700
3.čištění	13.02.2015	1,176	1,247	0,199	0,229	3,010	2,362
		1,176	1,328	0,199	0,273	3,010	1,649
4.čištění	06.03.2015	1,145	1,240	0,188	0,225	3,316	2,425
		1,145	1,306	0,188	0,260	3,316	1,841



Obr. 7. Koeficient přestupu tepla k a fouling faktor 1/f pro nečištěnou a čištěnou větev výměníku tepla v profilu „Farářství“

Zatímco relativní výkon nečištěné větve výměníku klesal v důsledku zarůstání biofilmem na 78-73%, čištěním byl výkon obnoven až téměř na 90% a udržován nad 82% (Obr. 8). K opětovnému poklesu výkonu však docházelo již po několika dnech po čištění.



Obr. 8. Relativní výkon nečištěné a čištěné větve výměníku tepla v profilu „Farářství“

Předběžné výsledky vyhodnocení v profilu „Nemocnice“ ukazují, že snižování výkonu výměníku v důsledku zarůstání biofilmem není tak významné jako v případě „Farářství“ (což koresponduje s nižším množstvím biofilmu).

5. Závěry

Zarůstání teplosměnné plochy výměníků tepla instalovaných ve stokové síti biofilmem a pokrývání sedimentem může vést k významnému poklesu jejich tepelného výkonu. Množství biofilmu i účinnost čištění se liší v závislosti na hydraulických podmínkách v místě instalace. Při nízkém tečném napětí je výměník pokryt větším množství sedimentu a biofilmu než při vyšším tečném napětí. Mechanickým čištěním lze výkon výměníku obnovit k 90%, avšak k opětovnému poklesu může dojít v řádu dnů.

Je tedy otázkou, zda místo častého čištění výměníku není vhodnější předjímat pokles výkonu odpovídajícím předimenzováním teplosměnné plochy. Pro zamýšlenou instalaci výměníku tepla ve stokové síti lze proto doporučit provést analýzu nákladů na čištění výměníku po celou dobu jeho očekávané životnosti ve srovnání s náklady na zvětšení teplosměnné plochy.

6. Poděkování

Projekt č. TA03020600 „Získávání tepelné energie z odpadní vody v kanalizačních sítích (enKAN)" je řešen s finanční podporou TA ČR. Tepelný výměník je vyvíjen ve spolupráci s firmou ATEKO, a.s. Monitoring umožnila Královéhradecká provozní, a.s.

7. Literatura

Bott, T.R. (1995). Fouling of Heat Exchangers. Elsevier.

DWA – M114 (2009). Energy from Wastewater – Thermal and Potential Energy. DWA Hennef.

Characklis, W.G. (1981). Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. Biotechnology and Bioengineering, 23(9), 1923–1960.

Stránský, D., Kabelková, I., Jelínek, M., Bareš, V. a Šťastná, G. (2014a). Vývoj tepelných výměníků pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci a výběr vhodných míst jejich instalace. Vodní hospodářství 64(8), 40-43.

Stránský, D., Kabelková, I., Nový, Z., Bareš, V., Šťastná, G. (2014b). Teoretický potenciál získávání tepla z odpadní vody ve stokovém systému. Sborník 14. ročníku konference Městské vody, 2.-3.10.2014, Velké Bílovice, pp. 133-140.

Wanner, O. (2004). Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Dübendorf: EAWAG.