# ZARŮSTÁNÍ, ČIŠTĚNÍ A ÚČINNOST VÝMĚNÍKŮ TEPLA V KANALIZACI: VÝSLEDKY PROVOZU FUNKČNÍCH VZORKŮ

Ivana Kabelková[1], David Stránský[2], Gabriela Štastná[3] , Vojtěch Bareš[4]

## Abstract

Two functional samples of in-sewer heat exchangers were installed in sewers with different hydraulic conditions (0.8 N/m$^2$ and 3 N/m$^2$, respectively). The research focused on the heat transfer efficiency due to surface fouling and on the effect of the mechanical cleaning (frequency 1 per 2 or 3 weeks). The amount of biofilm was higher at the site with lower shear stress (23.03±7.08 g/m$^2$) and cleaning reduced it to average 36%. However, the original amount was renewed already in about 35 days. In the sewer with higher shear stress there were only 15.89±5.46 g/m$^2$ of biofilm and cleaning kept the amount at about 18%. The biofilm renewal was slower (about half of the original amount after a month). At the first site the heat transfer efficiency dropped to 78-73% due to fouling, the cleaning recovered it to 90% and kept it above 82%. At the second site the decrease of the heat transfer efficiency was much less pronounced due to the small amount of the biofilm.

## Úvod

Výměníky tepla získávající energii z odpadní vody ve stokové síti mohou být jedním z alternativních zdrojů energie pro vytápění i chlazení budov [2]. Výměníky umístěné přímo v jednotné kanalizaci však zarůstají biofilmem a jsou zanášeny sedimenty, čímž je snižována účinnost přestupu tepla až o 50% [1] [3] [7]. Proto musí být výměníky pravidelně čištěny nebo předimenzovány.

Dosud však nebylo zodpovězeno, jak často musí být výměníky v jednotné kanalizaci čištěny, aby byl udržován přijatelný přestup tepla, a zda se liší se nutná frekvence čištění pro různé hydraulické podmínky.

Tento článek se zabývá experimentálním provozem funkčních vzorků výměníku tepla vyvíjeného v rámci výzkumného projektu, instalovaných ve stokové síti v pilotním povodí [4]. Hlavní pozornost je zaměřena na sledování vývoje účinnosti přenosu tepla a vlivu čištění teplosměnné plochy.

---

[1] Dr. Ing. Ivana Kabelková, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224354605, e-mail: kabelkova@fsv.cvut.cz

[2] doc. Ing. David Stránský, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224355412, e-mail: stransky@fsv.cvut.cz

[3] Mgr. Gabriela Šťastná, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224355447, e-mail: gabriela.stastna@fsv.cvut.cz

[4] Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, tel.: 224354339, e-mail: bares@fsv.cvut.cz

## Materiál a metody

### *Konstrukční řešení výměníku tepla*

Navržený výměník je deskového typu a je tvořen články z nerezové oceli o rozměrech 1800 x 250 x 30 mm zapojenými do série (Obr. 1). Tok oběhového média uvnitř každého článku usměrňují vnitřní přepážky, které jsou uspořádány vystřídaným způsobem a tvoří 35 tahů.

Jednotlivé články jsou propojeny pomocí pružných hadicových propojek, které umožňují určitou vůli v přesnosti instalace a rovněž instalaci i v zakřivených úsecích stokové sítě. Články jsou kotveny ke stěně potrubí pomocí patek. Hrany a spoje modulů i náběhová hrana jsou zakryty nerezovými kusy ve tvaru „U“, které zajišťují hladký přechod.

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.

Obr. 1. Články tepelného výměníku

### *Instalace funkčních vzorků v kanalizaci*

Pilotním povodím projektu je Hradec Králové. Pro instalaci funkčních vzorků výměníku byla na základě monitoringu a vyhodnocení potenciálu získávání tepelné energie a se souhlasem 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). Při provozu funkčních vzorků je nutno mařit vzniklé teplo. Použita byla chladicí jednotka od firmy JDK typu WDE s akumulační nádrží.

### *Čištění výměníků a odběry vzorků biofilmu*

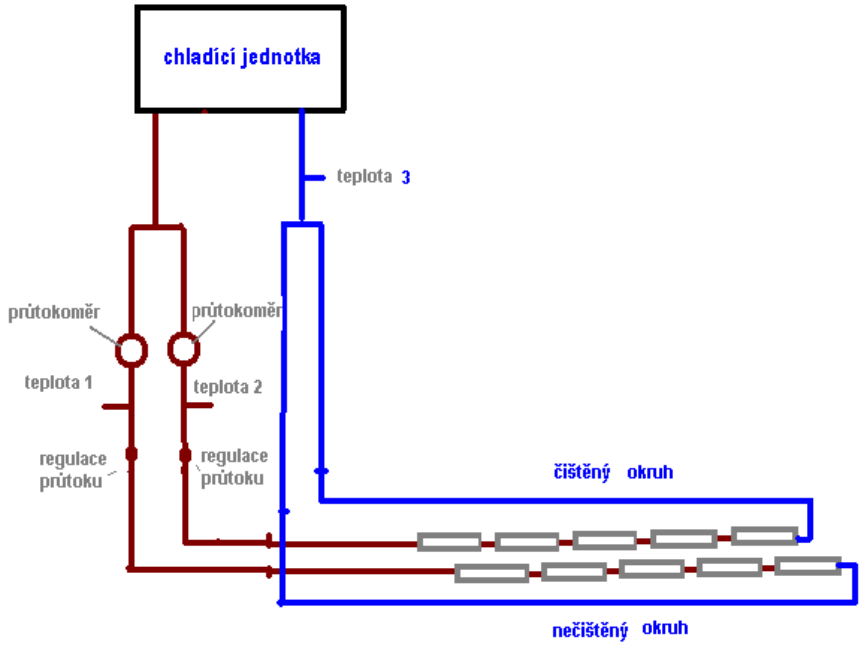
Levé větve funkčních vzorků výměníků byly čištěny, pravé nikoliv a slouží jako reference. Čištění bylo prováděno 1x za 2 až 3 týdny (15-21 dní). Jako nejvhodnější metoda bylo vyhodnoceno ruční mechanické čištění rýžovým kartáčem [6].

Před čištěním byly na nečištěných i na čištěných místech výměníku (na spojkách) odebírány vzorky biofilmu a sedimentů a laboratorně analyzována sušina a ztráta žíháním (tj. organická hmota). Ve dvou experimentech byl sledován též vliv intervalu čištění, kdy vzorky biofilmu byly odebrány z očištěných míst po 21 a 37 dnech, resp. po 18 a 35 dnech.

Zároveň byl na základě on-line monitoringu vyhodnocován koeficient přestupu tepla.

### *Systém monitoringu*

Schéma monitoringu pro sledování účinnosti tepelných výměníků je uvedeno na Obr. 2.




Obr. 2. 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).

Teploty jsou měřeny teplotními čidly Pt100 od výrobce Fiedler v intervalu 1 min. 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 Nemocnice. 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 intervalu 1 min ($q_1$ a $q_2$), resp. 3 min ($Q_{ov}$).

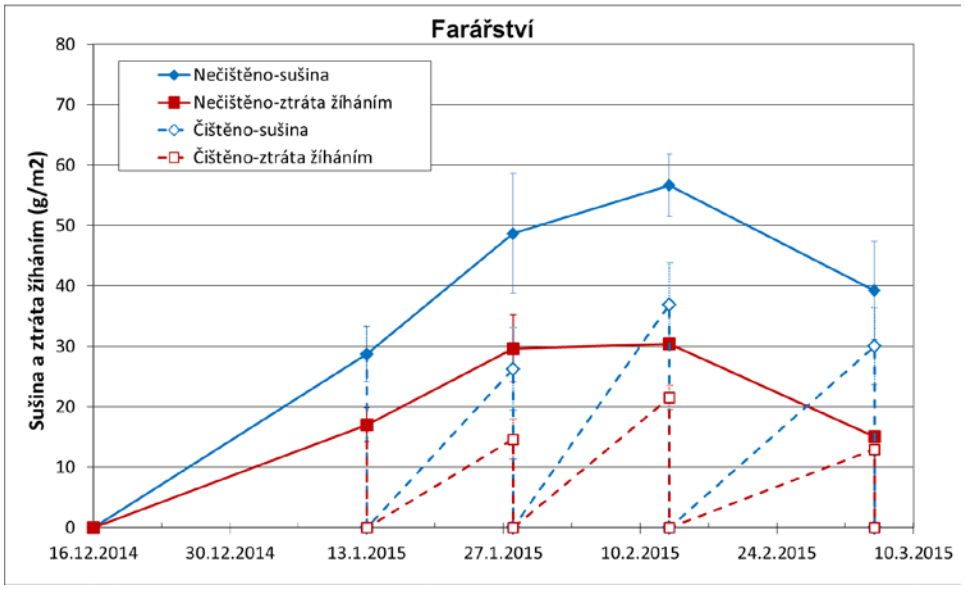
## Výsledky

### *Vliv čištění výměníku na množství biofilmu*

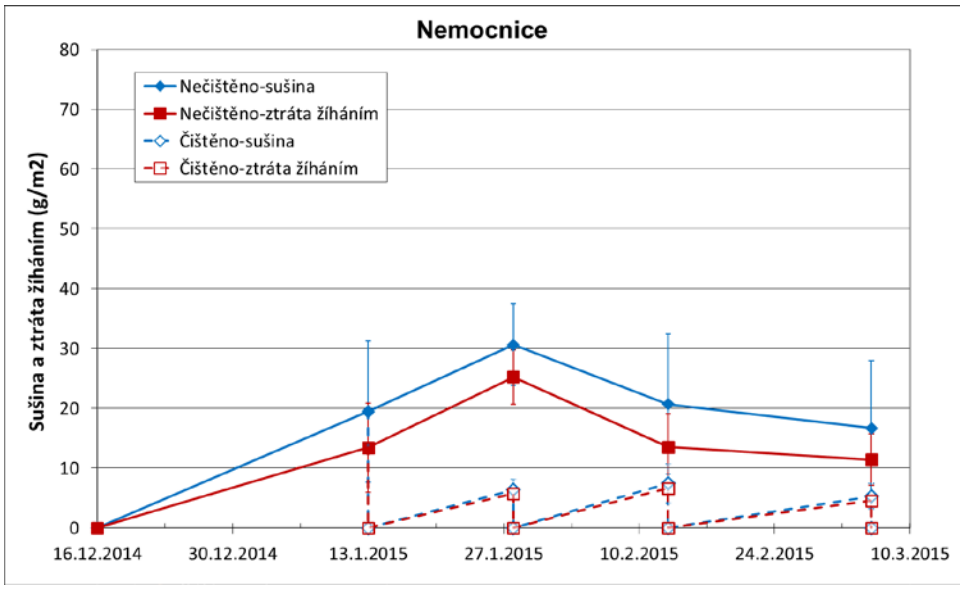
V profilu „Farářství“ (Obr. 3) se díky velmi nízkému tečnému napětí v místě instalace výměníku (0,8 N/m$^2$) udržovalo na výměníku ve sledovaném období poměrně vysoké

množství biofilmu a sedimentů (organický podíl na nečištěných i čištěných plochách byl cca 54%). Množství biofilmu i sedimentů bylo čištěním sníženo v průměru na cca 36% (předpokládán lineární průběh nárůstu biofilmu). Sušina se snížila z průměrných 43,33±10,44 g/m$^2$ na průměrných 15,54±2,21 g/m$^2$, ztráta žíháním z průměrných 23,03±7,08 g/m$^2$ na 8,18±1,86 g/m$^2$.

V profilu „Nemocnice“ (Obr. 4) byl vzhledem k vyššímu tečnému napětí (3 N/m$^2$) v místě instalace výměník pokryt menším množstvím biofilmu a zejména sedimentů, kdy organický podíl nečištěných ploch byl 76%, čištěných ploch 88%. Účinnost čištění byla z časového hlediska podstatně vyšší, protože zde se díky čištění udržovalo množství sušiny v průměru na cca 15% a množství biofilmu na cca 18% hodnoty nečištěných ploch (sušina poklesla z 21,86±5,25 g/m$^2$ na 3,18±0,44 g/m$^2$, ztráta žíháním se snížila z 15,89±5,46 g/m$^2$ na 2,81±0,42 g/m$^2$).

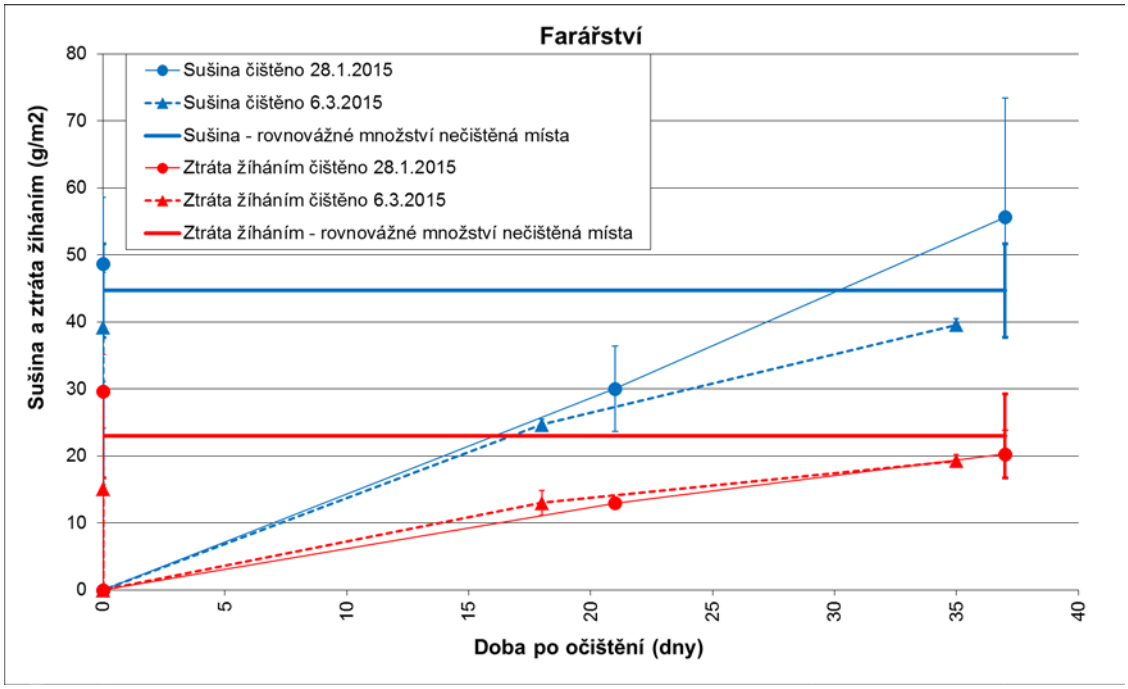



Obr. 3. Vývoj sušiny a množství biofilmu na čištěných a nečištěných plochách výměníku v profilu „Farářství“

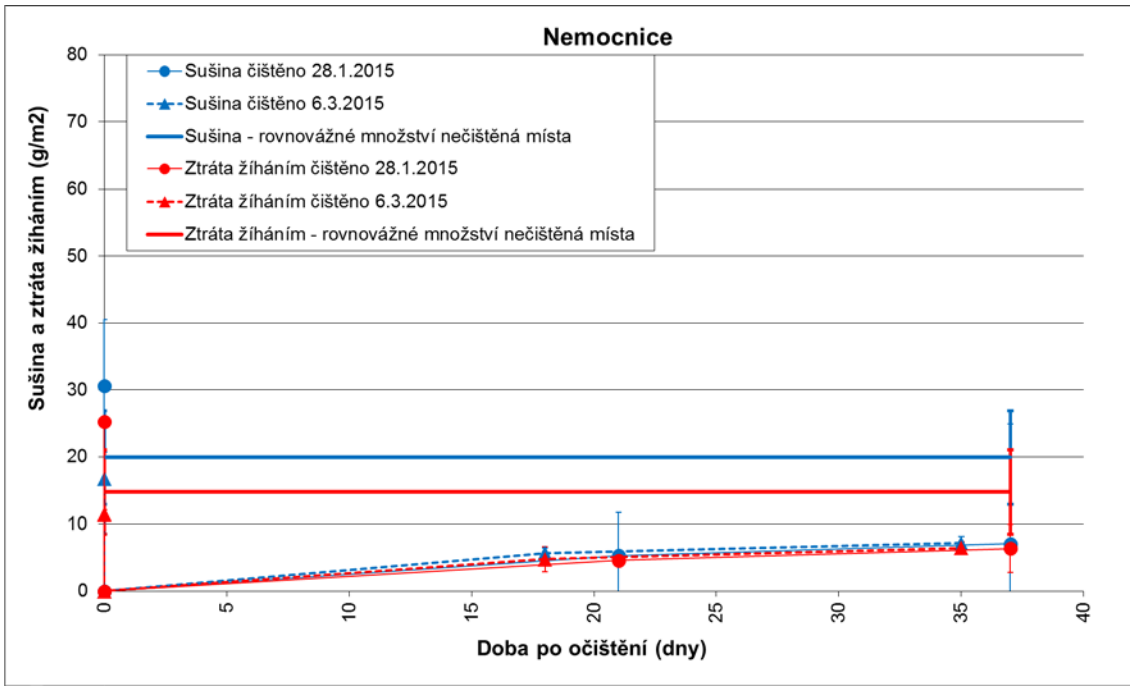



Obr. 4. Vývoj sušiny a množství biofilmu na čištěných a nečištěných plochách výměníku v profilu „Nemocnice“

Interval čištění hrál podstatně větší roli v profilu „Farářství“ než v profilu „Nemocnice“. V profilu „Farářství“ bylo původní množství biofilmu (tj. průměrné množství na nečištěných plochách) obnoveno zhruba po měsíci (přesněji 35 dnech) (Obr. 5). V profilu „Nemocnice“ byl nárůst biofilmu pomalejší – po měsíci od očištění ho bylo zhruba poloviční množství oproti nečištěným místům (Obr. 6).




Obr. 5. Nárůst sušiny a biofilmu na očištěných plochách výměníku v profilu „Farářství“ v závislosti na době po očištění




Obr. 6. Nárůst sušiny a biofilmu na očištěných plochách výměníku v profilu „Nemocnice“ v závislosti na době po očištění

### *Vliv čištění výměníku na 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 hodnota koeficientu přestupu tepla čistého výměníku bezprostředně po instalaci (referenční),

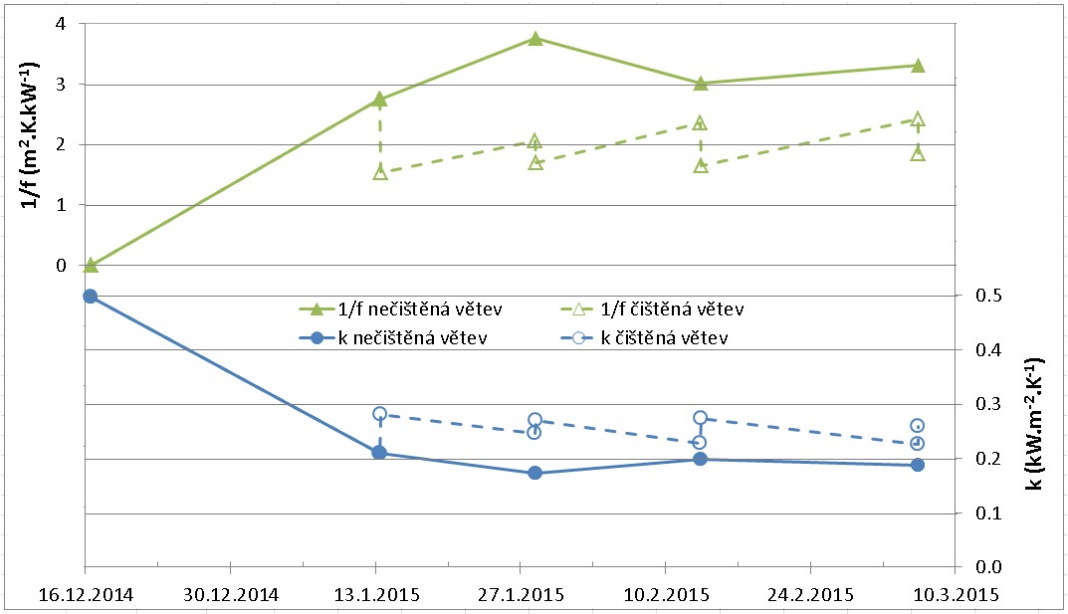
k je aktuální hodnota koeficientu přestupu tepla.

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 [7], který uvádí hodnoty 0 až 5 $m^2.K\ kW^{-1}$podle intervalu čištění a místních podmínek z hlediska tvorby biofilmu.

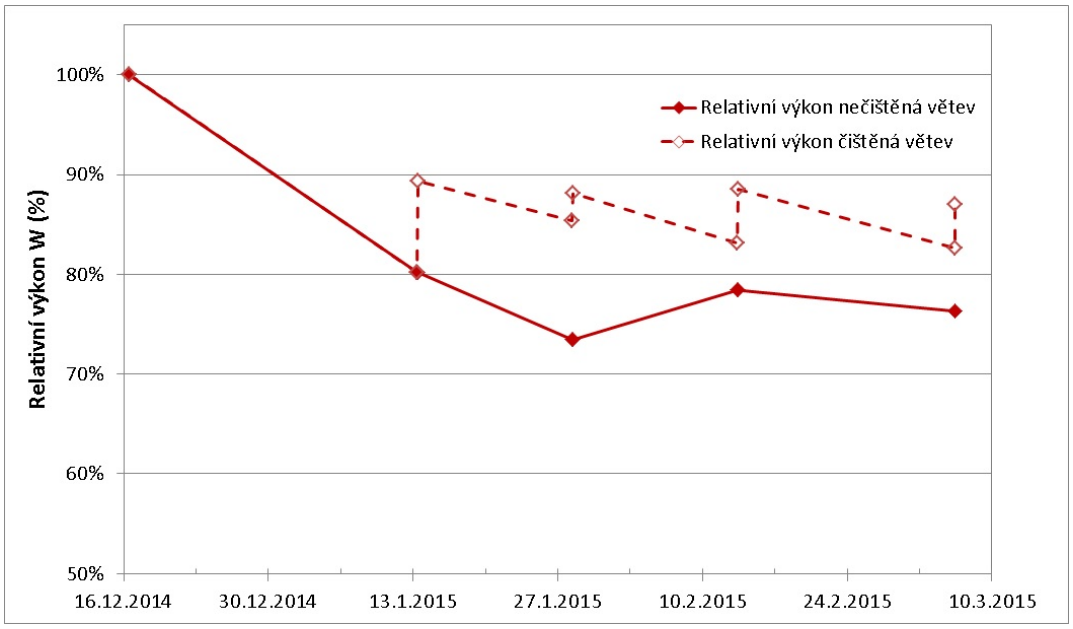
Tab. 1. Vliv čištění výměníku na koeficient přestupu tepla a fouling faktor v lokalitě „Farářství“

| 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 |

Tepelný výkon jedné větve výměníku byl v referenčním stavu 1,5 kW. 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. 7. Koeficient přestupu tepla k a fouling faktor 1/f pro nečištěnou a čištěnou větev výměníku tepla v profilu „Farářství“




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

V profilu „Nemocnice“ snižování výkonu výměníku v důsledku zarůstání biofilmem není tak významné jako v případě „Farářství“ (což koresponduje s nižším množstvím biofilmu).

## 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. Množství biofilmu v místě předpokládané instalace výměníku a nutnou četnost čištění lze zjistit pomocí in-situ odběrů vzorků biofilmu z pásků z materiálu výměníku instalovaných ve stoce.

## 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. Instalaci funkčního vzorku a jeho monitoring umožnily Vodovody a kanalizace Hradec Králové, a.s. a Královéhradecká provozní, a.s.

.

## Literatura

[1] Bott, T.R. (1995). *Fouling of Heat Exchangers*. Elsevier.

[2] DWA – M114 (2009). *Energy from Wastewater – Thermal and Potential Energy*. DWA Hennef.

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

[4] 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.

[5] 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.

[6] Stránský, D., Kabelková, I., Bareš, V., Šťastná, G., Jelínek, M. (2015). Experimentální provoz funkčního vzorku výměníku tepla v reálných podmínkách kanalizace. Sborník 20. ročníku konference Nové metody a postupy při provozování čistíren odpadních vod, 14.-15.4.2015, Moravská Třebová, pp.117-126.

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