Vývoj tepelných výměníků pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci a výběr vhodných míst jejich instalace

David Stránský, Ivana Kabelková, Miloš Jelínek, Vojtěch Bareš a Gabriela Šťastná

Abstrakt

Pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci byl vyvinut modulární tepelný výměník deskového typu z nerezového plechu. Pro vyvinutý typ výměníku byla specifikována kritéria ovlivňující možnost jeho instalace ve stokové síti (teoreticky dostupný tepelný výkon, průměr stoky, počet možných paralelních modulů výměníku v profilu stoky, hydraulické podmínky, riziko tvorby většího množství biofilmu). Na základě kombinace těchto kritérií jsou pak stoky klasifikovány jako vhodné, částečně vhodné či nevhodné pro instalaci výměníku. Postup byl aplikován v pilotním povodí Hradec Králové. Celková délka úseků vhodných pro instalaci tepelných výměníků je 642 m, délka částečně vhodných úseků je 8 645 m.

Klíčová slova

výměník tepla – odpadní voda – kritéria vhodnosti – tepelný výkon – monitoring – simulační model

Úvod

Jedním z alternativních způsobů využívání druhotných zdrojů energie jsou tepelná čerpadla. Dosud značně opomíjeným zdrojem energie pro tepelná čerpadla je odpadní voda v kanalizaci, která je přitom vzhledem k poměrně stálé teplotě mezi cca 10 a 20 °C po celý rok ideálním médiem využitelným k vytápění budov nebo ke kombinaci zimního vytápění a letního chlazení budov [2]. Ve světě existuje zhruba 500 zařízení (zejména Švýcarsko, Skandinávie, Německo) s výkonem 100 až 70 000 kW, přičemž první z nich byla vybudována již před více než 30 lety [7].

Oproti tomu v České republice je tepelná energie z odpadní vody využívána dosud velmi omezeně, a to spíše v budovách (z šedé vody) než v kanalizaci nebo na ČOV. Zatím proběhla pouze ojedinělá testování výměníků tepla na přítoku na ČOV [3] a jedna instalace v kanalizaci (ZUŠ Košíře v r. 2007, bez pravidelné údržby a bez sledování provozu). Důvody malého rozšíření výměníků tepla v kanalizaci v České republice jsou obavy z málo vyzkoušené technologie, z vysokých investičních nákladů a dlouhé doby návratnosti a z negativních vlivů snížené teploty odpadní vody na biologické čištění na ČOV (zejména na nitrifikaci a tedy odstraňování dusíku) a s tím spojené zvýšení provozních nákladů [9].

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 dlouhodobé účinnosti výměníku v důsledku zarůstání teplosměnné plochy biofilmem [1, 4].

V tomto článku je představen vyvinutý typ tepelného výměníku a popsána kritéria a postup výběru vhodných míst pro jeho instalaci ve stokové síti pilotního povodí.

Vývoj tepelného výměníku

Metody

Pro odběr energie budou využita tepelná čerpadla typu země/voda, standardně používaná pro zemní kolektory. Zemní kolektor však bude nahrazen výměníkem tepla ve stokové síti. Teplo obsažené v odpadní vodě se bude přenášet cirkulačním okruhem do výparníku tepelného čerpadla pomocí teplonosné kapaliny. Oběh teplonosné kapaliny bude zajišťovat oběhové čerpadlo, teplonosná kapalina se ve výparníku bude ochlazovat a v teplosměnných modulech v kanalizaci znovu ohřívat (**obr. 1**). Protože technologie tepelného čerpadla je běžně využívaná a praxí prověřená, soustředil se vývoj zejména na výměník tepla, který bude umístěn v odpadní vodě ve stokové síti.

Vývoj technologie funkčního vzorku tepelného výměníku se soustředil na následující body:

- maximalizaci přestupu tepla,
- modulární rozšiřování systému,
- odolnost výměníku v agresivních podmínkách stokové sítě,
- co nejjednodušší instalaci v prostředí stokové sítě,
- minimalizaci narušení průtočného profilu a zachytávání látek unášených odpadní vodou,
- co nejnižší výrobní náklady.

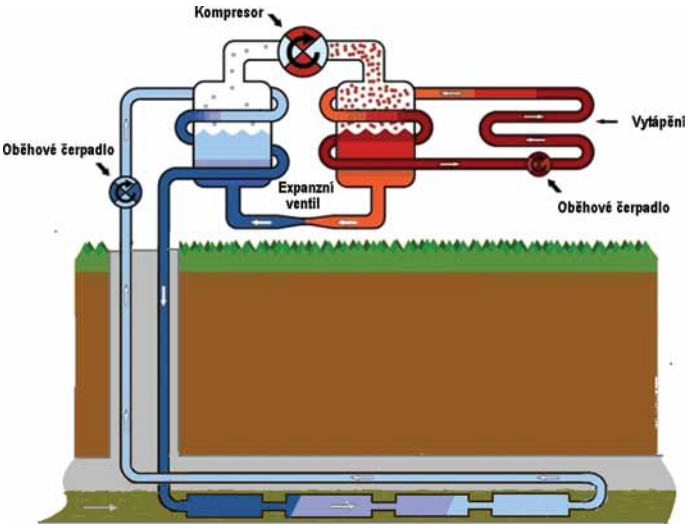
Výsledky

Konstrukční uspořádání

Byl navržen výměník deskového typu, jehož délka (délka jednoho modulu) 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). Ohřátá voda se bude vracet tlakovou hadicí z PE po vnější hraně výměníku. Fotografie zkušebního výrobku je na **obr. 2**.

Modulární konstrukční řešení umožňuje:

- instalaci v různých příčných profilech stokové sítě (s výjimkou atypických),
- instalaci více modulů paralelně v profilech, které to umožňují (viz **obr. 3**) (nutno zohlednit zajištění potřebného průchozího prostoru o minimální šířce 400 mm),



Obr. 1. Schéma systému získávání energie z odpadní vody v kanalizaci

Obr. 2. Zkušební výrobek modulu tepelného výměníku

Obr. 3. Schéma instalace modulů tepelného výměníku (vlevo: 1 řada modulů, vpravo: 4 řady modulů)

- sériové zapojení modulů,
- instalaci výměníku nejen v rovných, ale i v zakřivených úsecích stokové sítě,
- jednoduchou instalaci ve stísněných podmínkách stokové sítě.

Jednotlivé moduly budou spojeny krátkou tlakovou pružnou spojkou, která zároveň umožní určitou vůli v přesnosti instalace výměníku ve stokové síti, která je díky povaze prostředí omezená. Detail koncovky výměníku, na který bude umístěna pružná tlaková spojka, je na **obr. 4**.

Materiál

Vzhledem k agresivnímu prostředí ve stokovém systému a vlastnostem tepelného přenosu byl jako ideální materiál výměníku zvolen nerezový plech. Drobné nerovnosti mezi výměníkem a stěnou potrubí (často nerovnou, zvláště u betonových potrubí) budou vyrovnány pomocí podložky z lehčeného polypropylenu.

Minimalizace hydraulického odporu ve stoce

Hrany a spoje modulů budou při instalaci zakryty nerezovými kusy ve tvaru „U“, které zajistí hladký přechod mezi jednotlivými moduly výměníku, aby bylo zabráněno zachytávání pevných látek unášených kanalizací. Stejně tak náběhová hrana (proti proudu) bude upravena nerezovým krytem.

Tvar výměníku zároveň umožňuje minimální snížení hydraulické kapacity profilu. Při instalaci jedné řady modulů výměníku v kruhovém profilu DN800 bude snížení plochy příčného profilu pouze o 1,7 %, při instalaci 4 paralelních řad výměníků do kruhového profilu DN1500 bude průtočná plocha profilu snížena o 2,0 %. Vyvinutý typ výměníku má tak zanedbatelný vliv na hydraulickou kapacitu stokové sítě.

Druh pracovního nosného média

Jako pracovní nosné médium byla zvolena voda, a to z následujících důvodů:

- zabránění riziku při úniku média do prostředí stokové sítě (smíchání s odpadní vodou),
- zjednodušení povolování umístění výměníku do stokové sítě (v obecné rovině).

Výběr míst instalace tepelných výměníků

Výběr vhodných míst instalace výměníků ve stokové síti zahrnoval následující kroky:

- specifikace kritérií vhodnosti jednotlivých stok pro instalaci tepelných výměníků,
- monitoring v pilotním povodí,
- rekalibrace srážko-odtokového modelu pilotního povodí (bezdeštné průtoky),
- vyhodnocení jednotlivých stok v pilotním povodí podle jednotlivých kritérií a podle jejich kombinace.

Metody

Specifikace kritérií vhodnosti stok pro instalaci výměníku

Kritéria vhodnosti stok pro instalaci výměníku závisí do určité míry na typu a konstrukci výměníku. Pro vyvinutý typ výměníku byla specifikována následující kritéria ovlivňující možnost jeho instalace a množství tepelné energie získané z odpadní vody:

- teoreticky dostupný tepelný výkon,
- průměr stoky,
- počet možných paralelních modulů výměníku v profilu stoky,
- hydraulické podmínky (hydraulická kapacita stoky, tlakové proudění),
- riziko tvorby většího množství biofilmu.

Teoreticky dostupný tepelný výkon. Hodnota teoreticky dostupného tepelného výkonu v jednotlivých úsecích stok W_{WT} (kW) se vypočte jako:

$$W_{WT} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot DT \qquad (1)$$

kde je c (kWs.kg^{-1}.°C^{-1}) měrná tepelná kapacita odpadní vody (pro teplotu vody od 0 °C do 20 °C lze použít konstantní hodnotu 4,19 kJ.kg^{-1}.°C^{-1}),

ρ (kg.l^{-1}) hustota odpadní vody (pro teplotu vody od 0 °C do 20 °C lze použít konstantní hodnotu 1 kg.l^{-1}),

Q (l.s^{-1}) průtok odpadní vody,

DT (°C) rozdíl teplot odpadní vody při nátoku T_1 (°C) a odtoku T_2 (°C) z výměníku.

Z rovnice 1 je patrno, že důležitými faktory ovlivňujícími tepelný výkon výměníku jsou průtok odpadní vody Q a využitelný rozdíl teplot DT.

Obr. 4. Detail koncovky výměníku, na nějž bude umístěna pružná tlaková spojka

Stanovili jsme, že pro potřeby vytápění je směrodatný průměrný denní průtok odpadní vody Q v topném období (1. 9.–31. 5.). Jeho hodnoty v jednotlivých stokách byly získány ze simulačního modelu kalibrovaného na bezdeštné průtoky.

Čím vyšší je teplota odpadní vody T_1, tím více tepla je z ní možno odebrat. Určili jsme, že směrodatná je průměrná denní teplota odpadní vody v topném období vyjádřená na dolní hranici intervalu spolehlivosti 95 %. Data byla získána monitoringem v uzávěrných profilech kmenových stok pilotního povodí. Při vyhodnocování jsme předpokládali, že teploty podél kmenových stok jsou konstantní. Tento předpoklad je na straně bezpečnosti [8, 5]. Dále jsme stanovili, že odpadní voda ve stoce se nesmí ochladit na méně než 8 °C, což je hodnota T_2. Toto číslo odpovídá v pilotním povodí průměrné denní teplotě odpadní vody cca 12 °C (**tab. 1**), což je teplota, při níž není ohrožena nitrifikace a odstraňování dusíku na ČOV [2].

Průměr stoky. Toto kritérium zohledňuje možnost instalace výměníku a přístupnost pro údržbu a čištění výměníku. Data byla získána z GIS stokového systému pilotního povodí.

Počet paralelních modulů výměníku. Počet paralelních modulů výměníku, které je možno do určité stoky instalovat, je závislý na minimální denní výšce hladiny protékající odpadní vody H_{min} a na dimenzi potrubí (**tab. 2**). Potřebné informace byly získány ze simulačního modelu kalibrovaného na bezdeštné průtoky.

Hydraulické podmínky. Výměníky nesmí významně snižovat hydraulickou kapacitu stoky a nesmí být instalovány v přetížených stokách. Analýza stokového systému pilotního povodí byla provede-

Tab. 1. Statisticky vyhodnocená data z monitoringu průtoků (Q) a teplot (T_1) v uzávěrných profilech kmenových stok v pilotním povodí

			A	1A	B	C	1C	D	E
Q	Průměr	(l.s^{-1})	60	26	58	61	27	65	31
T_1	Průměr	(°C)	12,9	13,4	12,1	14,8	13,7	14,1	13,8
	dolní hranice intervalu spolehlivosti 95 %	(°C)	7,6	9,9	8,6	10,3	8,9	10,9	9,6

Tab. 2. Počet paralelních modulů výměníku pro různé rozsahy minimálních denních výšek hladiny vody v kruhových stokách

Průměr kruhové stoky (mm)	Počet paralelních modelů výměníku			
	0	1	2	4
	Rozsah minimálních denních výšek hladiny vody (mm)			
800	< 50	50–266	267–511	> 51
1 000	< 45	45–223	224–451	> 451
1 200	< 43	43–193	194–397	> 397
1 500	< 40	40–162	163–335	> 335
2 000	< 37	37–129	130–265	> 265

na pomocí původního simulačního modelu kalibrovaného na dešťové průtoky 10leté dešťové řady.

Biofilm. Biofilm, kterým zarůstá teplosměnná plocha výměníku, vede ke snížení účinnosti přenosu tepla až o 50 % [8]. To má ekonomické důsledky, protože je buď nutno navrhnout větší plochu výměníku jako kompenzaci, nebo je nutno výměník pravidelně čistit. V jednotné kanalizaci dochází k (částečnému) odplavení biofilmu během zvýšených průtoků za deště. Riziko tvorby většího množství biofilmu bylo orientačně zjišťováno nepřímo přes rychlost proudění ve stoce. Jako kritérium udržování účinnosti přenosu tepla na cca 80 % bylo dle [10] stanoveno překročení rychlosti 1 m.s^{-1} po dobu delší než 20 minut s četností 1x za tři týdny (p=17). Analýza stokového systému pilotního povodí byla provedena pomocí původního simulačního modelu kalibrovaného na dešťové průtoky 10leté dešťové řady.

Klasifikace. Číselné hodnoty kritérií a klasifikace vhodnosti stok pro instalaci výměníku jsou v **tab. 3**. Hraniční hodnota dostupného tepla 100 kW je založena na ekonomické rentabilitě [6]. Celkové vyhodnocení je dáno nejhorší hodnotou jednotlivých kritérií (kromě kritéria biofilmu, které není diskriminační a slouží jen jako upozornění na možné zvýšení nákladů).

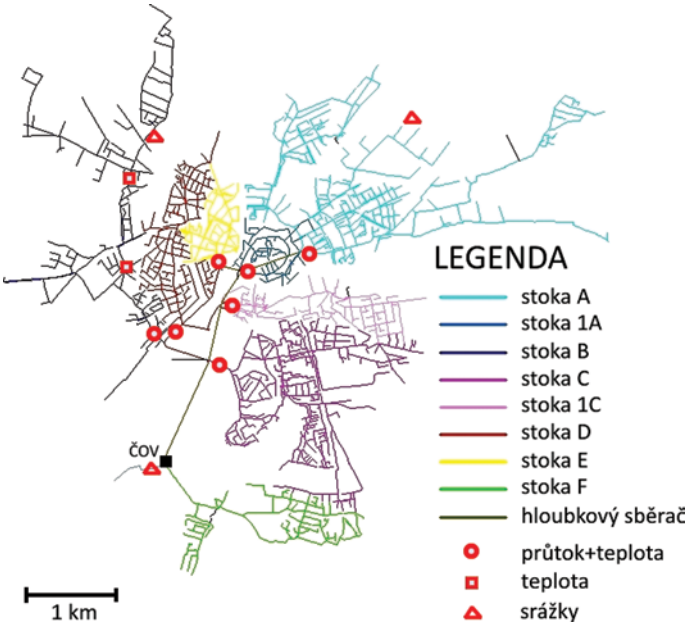
Tab. 3. Kritéria vhodnosti stok pro instalaci výměníku

Kritérium		Klasifikace vhodnosti stok		
		nevhodné	částečně vhodné	vhodné
Teoreticky dostupný tepelný výkon	(kW)	< 100	---	≥ 100
Průměr stoky	(mm)	< 800	800–1200	> 1200
Paralelní moduly	(počet)	0	1	> 1
Snížení hydraulické kapacity	(%)	> 5%	---	≤ 5%
Tlakové proudění	(četnost)	> 1 za 2 roky	---	≤ 1 za 2 roky

Monitoring v pilotním povodí

Pilotním povodím je Hradec Králové (90 000 obyvatel), který je odvodněn jednotnou kanalizací s osmi kmenovými stokami (A, 1A, B, 1C, C, D, E a F) zaústěnými do přivaděče na ČOV. Celková délka stok je 497 km.

V pilotním povodí byl proveden roční monitoring (02/2013 až 02/2014) průtoků odpadní vody, teplot odpadní vody a vzduchu a srážek. Přehledné schéma monitoringu je na **obr. 5**. Měření průtoků bylo instalováno v 7 uzávěrných profilech kmenových stok, teplotní charakteristiky odpadní vody v 9 profilech (2x bez měření průtoků v dílčím povodí kmenové stoky B), měření srážek a teplot vzduchu ve dvou profilech. Měření všech charakteristik bylo prováděno v časovém kroku 6 minut s výjimkou teplot vzduchu (krok 1 hodina) a srážek (při dešti krok 1 minuta). Obsluha a údržba přístrojů byla prováděna v intervalu cca 1x za 3 týdny.



Obr. 5. Situační mapa monitoringu v pilotním povodí Hradec Králové

Rekalibrace modelu

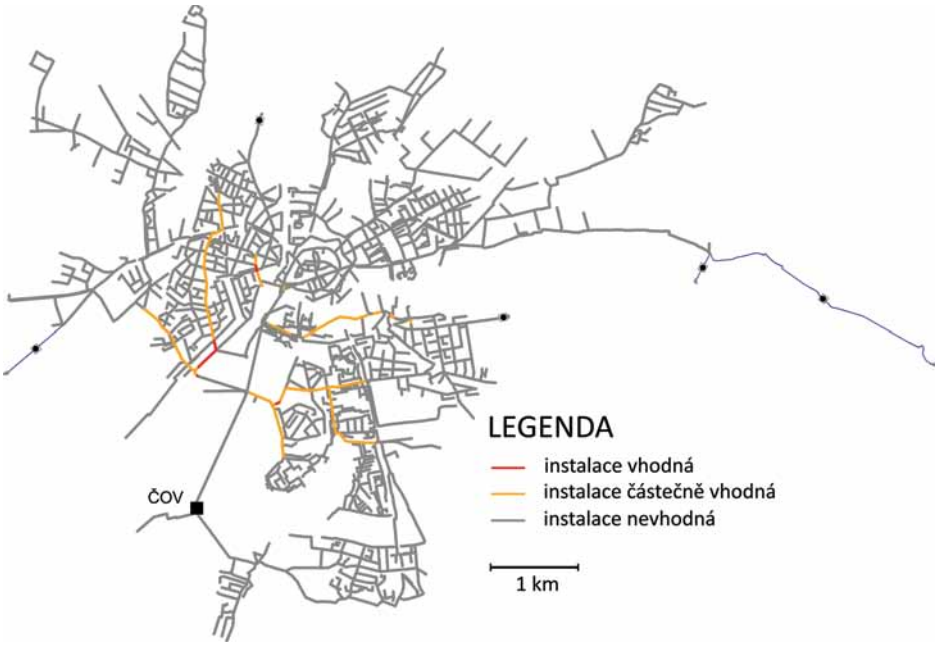
Srážko-odtokový simulační model stokové sítě vytvořený v r. 2005 pro účely Generelu odvodnění v DHI software MIKE URBAN 2012 byl původně kalibrován především se zřetelem na průtoky za deště. Rekalibrace modelu pro bezdeštné průtoky byla provedena na základě údajů získaných monitoringem průtokových charakteristik.

Výsledky

Vhodné stoky pro instalaci výměníku podle jednotlivých kritérií

Vyhodnocení vhodnosti stok pro instalace tepelných výměníků v pilotním povodí podle jednotlivých kritérií je shrnuto v **tab. 4**. Hydraulické podmínky byly vyhodnocovány jen pro stoky s dostupným teplem ≥ 100 kW a nikde nebyly limitujícím faktorem. Jako nejpřísnější kritérium z vyhodnocení vyšlo dostupné teplo, jako nejmírnější průměr stoky. Z praktických důvodů se proto doporučuje začít vyhodnocování buď od nejpřísnějšího kritéria, nebo od toho, které se vyhodnocuje nejsnáze, a potom pokračovat vyhodnocením ostatních kritérií.

Orientační kritérium odplavování biofilmu za deště bylo překročeno ve 12 úsecích stokové sítě o celkové délce 461 m, avšak po detailnější analýze dat se ukázalo, že k překročení nedochází v topné sezóně. Riziko tvorby většího množství biofilmu se tedy vyskytuje v topném období u všech stok, kde by mohly být instalovány výměníky. Pokud by však byly výměníky využívány i pro chlazení v létě, četnost čištění teplosměnné plochy by mohla být snížena.



Obr. 6. Vhodné a částečně vhodné stoky pro instalaci výměníků tepla v pilotním povodí Hradec Králové

Tab. 4. Klasifikace vhodnosti stok v pilotním povodí pro instalaci tepelných výměníků podle jednotlivých kritérií

Klasifikace vhodnosti	Teoreticky dostupné teplo		Průměr stoky		Paralelní moduly	
	Počet stok	Délka (m)	Počet stok	Délka (m)	Počet stok	Délka (m)
Vhodné	182	10 742	293	17 920	25	1 851
Částečně vhodné	---	---	611	37 597	460	24 597

Vhodné stoky pro instalaci výměníku podle kombinace kritérií

Celkové vyhodnocení stok v pilotním povodí pro kombinaci kritérií je zobrazeno na **obr. 6**. Celková délka úseků vhodných pro instalaci tepelných výměníků je 642 m, délka částečně vhodných úseků je 8 645 m. Nejvhodnější je instalovat výměníky ve spodních částech kmenových stok B, C a D.

Závěry

Představený postup posuzování vhodnosti stok pro instalaci výměníku tepla je obecně použitelný, avšak v případě jiných typů výměníku nebo jiných klimatických a ekonomických podmínek musí být hodnoty kritérií vhodnosti příslušně upraveny.

Teplotní a průtokové charakteristiky použité pro identifikaci vhodnosti jednotlivých stok obsahují určité nejistoty, protože monitoring i kalibrace simulačního modelu byly provedeny pouze v uzávěrných profilech kmenových stok. Před každým zamýšleným projektem instalace tepelného výměníku do stoky by proto měl být proveden sezónní monitoring teplot a průtoků v místě instalace a jejich statistické vyhodnocení.

V rámci projektu bude provedeno vyhodnocení realizovatelného potenciálu stokové sítě pilotního povodí pro získávání tepla z odpadní vody, které bude zohledňovat informace o možných odběratelích tepla (v závislosti na vzdálenosti od stoky a potřebě energie), ekonomickou návratnost a okrajové podmínky dané především přípustným snížením teploty odpadní vody vzhledem k účinnosti a nákladům čištění odpadních vod.

Vyvinutý tepelný výměník bude instalován na dvou lokalitách v pilotním povodí a bude testován jeho provoz a různé způsoby údržby za účelem minimalizace nárostů biofilmu (včetně toho, do jaké míry je v jednotné kanalizaci biofilm odplavován za dešťových událostí).

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. Simulační model poskytly Vodovody a kanalizace Hradec Králové, a.s., a monitoring umožnila Královéhradecká provozní, a. s.*

Literatura/References

[1] Bott, T.R. (1995). Fouling of Heat Exchangers. Elsevier.
[2] DWA – M114 (2009). Energy from Wastewater – Thermal and Potential Energy. DWA Hennef.
[3] Holba, M., Bartoník, A., Škorvan, O., Horák, P., Počinková, M. a Plotěný, K. (2012). Energetický potenciál odpadních vod. *Vodní hospodářství* 62(2), 42-48.
[4] Characklis, W.G. (1981). Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 23(9), 1923–1960.
[5] Monsalve, S.N. (2011). Energy in the Urban Water Cycle: A Case Study of Heat Recovery in the Sewer System of Amsterdam. MSc Thesis, Waternet – Politecnico di Torino – TU Delft.
[6] Müller, E.A. und Butz, J. (2010). Abwasserwärmenutzung in Deutschland – Aktueller Stand und Ausblick. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57(5), 437–442.
[7] Schmid, F. (2008). Sewage Water: Interesting Heat Source for Heat Pumps and Chillers. 9th International IEA Heat Pump Conference, Switzerland. Paper No. 5.22, 1–12.
[8] Wanner, O. (2004). Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Dübendorf: EAWAG.
[9] Wanner, O., Panagiotidis, V., Clavadetscher, P. and Siegrist, H. (2005). Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants. *Water Research* 39, 4725-4734.
[10] Wanner, O. (2005). Biofilms Hamper Heat Recovery. *Eawag News* (60), 31-32.

Ing. David Stránský, Ph.D.[1] (autor pro korespondenci)
Dr. Ing. Ivana Kabelková[1]
Mgr. Gabriela Šťastná, Ph.D. [1]
Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D. [2]
Ing. Miloš Jelínek, CSc. [3]

[1] České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra zdravotního a ekologického inženýrství
Thákurova 7
166 29 Praha 6
stransky@fsv.cvut.cz

[2] České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrauliky a hydrologie
Thákurova 7
166 29 Praha 6

[3] ATEKO a. s.
Resslova 956/2
500 01 Hradec Králové

Vývoj tepelných výměníků pro získávání tepla z odpadní vody v kanalizaci a výběr vhodných míst jejich instalace (Stránský, D.; Kabelková, I,; Jelínek, M.; Bareš, V., Šťastná, G.)

Abstract

A modular plate in-sewer heat exchanger made of stainless steel was developed to enable heat recovery from the wastewater in the sewer system. Suitability criteria for its installation were specified (theoretically available heat, sewer diameter, number of the heat exchanger parallel modules in the sewer cross-section, hydraulic conditions, risk of increased fouling) in order to classify sewers as suitable, party suitable and unsuitable. The approach was applied in a pilot catchment of Hradec Kralove. The total length of the reaches suitable for installation of the heat exchangers is 642 m, that of the partly suitable reaches is 8,645 m.

Key words
heat exchanger – wastewater – suitability criteria – theoretically available heat – monitoring – simulation model

Tento článek byl recenzován a je otevřen k diskusi do 31. října 2014. Rozsah diskusního příspěvku je omezen na 2 normostrany A4, a to včetně tabulek a obrázků.
Příspěvky posílejte na e-mail stransky@vodnihospodarstvi.cz.