

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

Dynamika teplotních polí deskových otopných těles

Temperature Fields Dynamic of Panel Radiators

Recenzent
Ing. Petr Šerks

Článek je zaměřen na sledování, rozbor a popis tepelné dynamiky deskového otopného tělesa mimo tepelně ustálený stav. Základem je rozložení teplotního pole na čelní straně teplosměnné plochy sledované termovizní kamerou. Sledováno bylo těleso Korado Radik klasik typu 10 v modulovém rozměru 500×1000 mm s jednostranným napojením shora dolů ve fázi náběhu. Termogram čelní desky byl rozdělen na 9 plošně shodných částí a v každé této části pak byly graficky nalezeny hodnoty doby dopravního zpoždění, doby průtahu, doby náběhu, časové konstanty a setrvačnosti náběhu, coby dynamické veličiny popisující rychlost změny tepelného stavu. Je zde popsán vztah těchto hodnot vzhledem ke geometrii konkrétního tělesa a závislost jejich změny na čase.

Klíčová slova: deskové otopné těleso, teplotní pole, teplosměnná plocha

The paper focuses on monitoring, analysis and description of the thermal dynamic of a panel radiator outside the thermally steady state. It is based on the temperature field distribution on the front side of the heat exchange surface, monitored by the thermal imaging camera. Monitored radiator was the Korado Radik classic Type 10 in modular size 500×1000 mm with one-sided connection from the top to the bottom, in the heat-up phase. The thermographic image of the front plate was divided into 9 parts with equal surface area. In each of the parts were graphically assessed the values of the transport delay, dead time, heat-up time, time constant and heat-up inertia, as the dynamic variables describing the speed of change of the thermal state. The relationship of these values is described, with respect to the geometry of the particular radiator and the time-dependence of their change.

Keywords: panel radiator, temperature field, heat transfer surface

ÚVOD

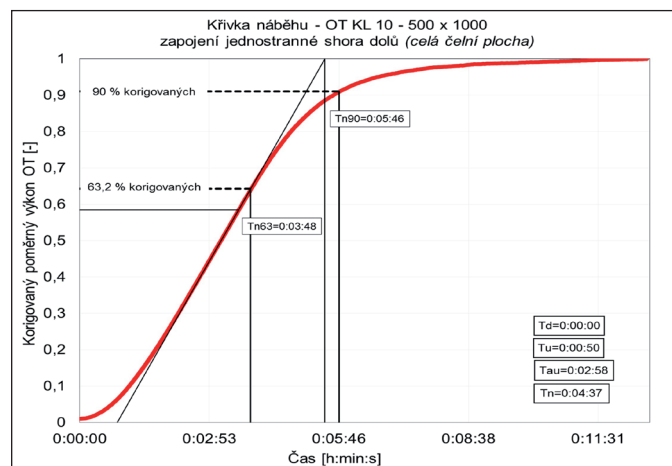
Dynamickému chování otopných ploch, resp. celých soustav, je v poslední době věnována zvýšená pozornost, a to nejen v ČR, ale především ve světě. Dnes je vyvíjen tlak na maximální optimalizaci provozu jakéhokoliv zařízení a tedy i otopných soustav, kde mohou být podstatnými akumulacími prvky například otopná tělesa a my tak potřebujeme popsat právě jejich dynamické chování.

Této úzké problematice se intenzivně věnovali autoři mj. i v tomto odborném periodiku, viz [1], [2] a [9], kde popisovali různé přístupy k řešení, vizualizaci či simulaci dynamiky jednotlivých otopných těles. Složitějšími postupy matematické identifikace chování celé otopné soustavy (například metodou „gray box“) se pak zabývali někteří zahraniční autoři [7]. Tento příspěvek se však bude věnovat konkrétnímu otopnému tělesu a přímo tak navazuje na české autory.

Je třeba obecně rozlišovat dva dynamické děje v provozu každého otopného tělesa – náběh a chladnutí. Podrobná analýza např. viz [5] nebo [3]. Každý z těchto dějů je charakteristický mj. svou přechodovou křivkou, tzn. závislostí změny výkonu (resp. v případě využití termovizní kamery změny povrchové teploty) na čase. Zatímco pro chladnutí otopných těles je typický průběh křivky se závislostí prvního řádu, a je tak relativně snadno matematicky popsatelný [8], tak pro náběh je situace mnohem složitější. U přechodové charakteristiky zpočátku nevíme, jakého bude u konkrétního tělesa řádu, minimálně však druhého či vyššího. Toto je způsobeno samotným principem děje náběhu, kdy se mnoho veličin, při chladnutí konstantních, stává proměnnými. Neznámou se tak stává i velikost teplosměnné plochy, kterou otopné těleso aktuálně sdílí teplo do svého okolí, kdy dochází k postupnému vytlačování stávajícího vodního obsahu otopného tělesa o teplotě vyrovnané s okolím vodou o vyšší přírodní teplotě.

METODIKA

K pochopení vývoje tzv. aktivní teplosměnné plochy bylo zkoumáno základní otopné těleso 10 – 500×1000 , zapojené jednostranně shora dolů. Po určení a nastavení jmenovitých parametrů teploty a hmotnostního průtoku byla s využitím termovizní techniky nasnímána série termogramů při náběhu tělesa se snímáním po 5 s. Tím byla získána zmíněná závislost povrchové teploty na čase, tedy přehled o vývoji teplotního pole na celé čelní ploše otopného tělesa, přičemž děj byl sledován od počáteční změny střední povrchové teploty (tzn. bez dopravního zpoždění) až do ustáleného stavu. Podle postupu vycházejícího z metody tečny v inflexním bodě, kdy se křivka



Obr. 1 Křivka náběhu procentuálně vyjádřeného tepelného výkonu deskového otopného tělesa Korado Radik klasik 10 – 500×1000 pro celou čelní plochu
Fig. 1 Heat-up curve of relative heat output for the whole front surface of the plate radiator Korado Radik klasik 10 – 500×1000



Obr. 2 Schéma rozdělení čelní průmětné plochy deskového otopného tělesa na 9 shodných částí

Fig. 2 Scheme showing division of the front projection plane of the panel radiator into 9 identical areas

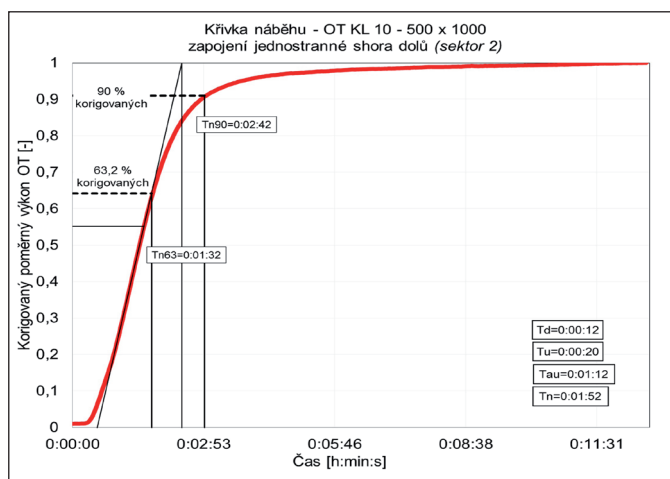
vyššího řádu nahradí závislostí prvního řádu s dopravním zpožděním [6], bylo provedeno základní vyhodnocení všech dynamických veličin popsaných výše. Výsledek ukazuje obr. 1, kde je získaná přechodová charakteristika vyjádřena jako procentuální náběh tepelného výkonu daného deskového tělesa. Výsledné hodnoty jednotlivých veličin jsou samozřejmě silně závislé na druhu či typu zkoumaného otopného tělesa. Hodnoty setrvačností náběhu T_n jsou plně ve shodě s již dříve získanými daty [5].

Pro získání přehledu o dynamice v různých částech otopného tělesa, resp. o vývoji aktivní teplosměnné plochy, byla čelní otopná plocha souměrně rozdělena na 9 vyhodnocovaných oblastí podle jednoduchého schématu na obr. 2. Jednotlivé sektory se v průběhu náběhu samozřejmě ovlivňují a účelem je tedy popsat do jaké míry a rovněž zhodnotit význam jednotlivých dynamiku popisujících veličin tak, aby bylo možné predikovat vývoj aktivní teplosměnné plochy bez nutnosti využít experimentu.

Rozdělení na určitý počet částí ve směru délky tělesa či jeho výšky dává jasnější představu vlivu rozměrů tělesa na jeho tepelnou dynamiku. Obecně sledujeme závislost dynamického parametru na parametru statickém, a to samozřejmě v závislosti na způsobu připojení tělesa k otopné soustavě. V každé z vytyčených oblastí byly, stejným způsobem jako pro celou čelní plochu, vyhodnoceny přechodové charakteristiky, resp. veličiny z nich plynoucí. Časová osa je zachována na všech obrázcích ve stejném rozsahu za účelem snadného porovnání jednotlivých průběhů.

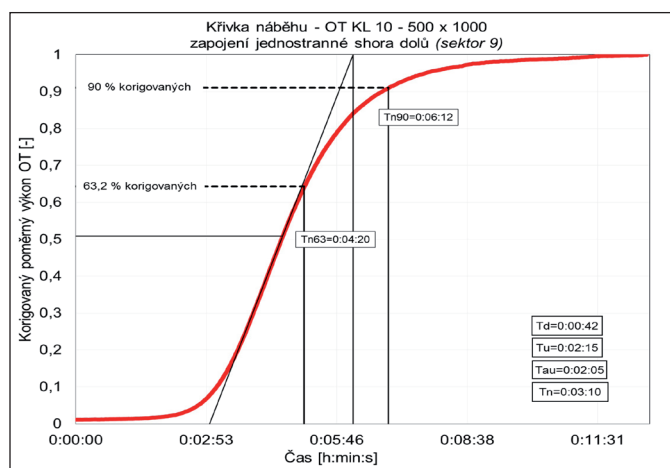
VIHODNOCENÍ

Z důvodu omezení délky tohoto textu zde nelze prezentovat přechodové charakteristiky všech sektorů, proto jsou vybrány pouze dva, ve kterých je jasně zřetelný rozdíl v průběhu náběhu – sektory 2 a 9. Zatímco v sektoru 9 je např. v čase 2 min a 53 vteřin výkon této čas-



Obr. 3 Křivka náběhu tepelného výkonu v sektoru 2

Fig. 3 Heat-up curve of heat output in the sector 2



Obr. 4 Křivka náběhu tepelného výkonu v sektoru 9

Fig. 4 Heat-up curve of heat output in the sector 9

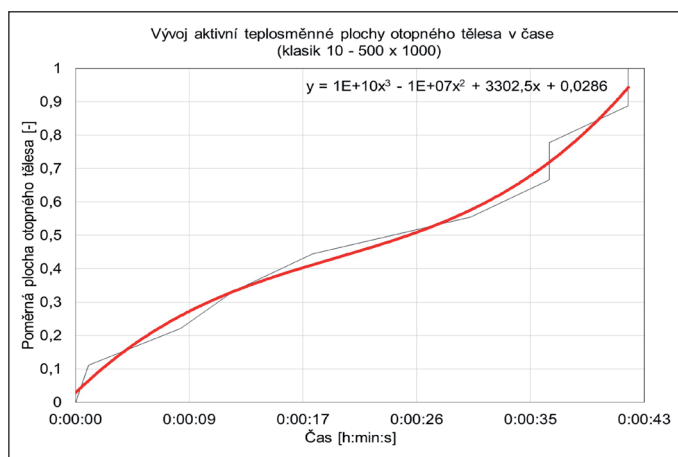
ti teplosměnné plochy cca 6 %, tak výkon v sektoru 2 je více než 90 %, což je z hlediska popisu aktivní teplosměnné plochy rozdíl zcela zásadní.

Rozdíl výkonu v čase mezi jednotlivými sektory lze popsat rozбором jednotlivých dynamických veličin. Tab. 1 shrnuje tyto veličiny pro jednotlivé sektory a rovněž pro celou čelní plochu. Vyhodnocena byla doba dopravního zpoždění (T_d), doba průtahu (T_u), doba náběhu (T_n), setrvačnosti náběhu T_{n63} a T_{n90} a časová konstanta (τ).

Tab. 1 Tabulka dynamických veličin pro celou čelní plochu a jednotlivé sektory

Tab. 1 Table of the dynamic quantities for the whole front surface and for the individual sectors

Hodnota [h:min:s]	Čelní plocha	Sektor								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_d	0:00:00	0:00:00	0:00:12	0:00:18	0:00:08	0:00:30	0:00:36	0:00:36	0:00:42	0:00:42
T_u	0:00:50	0:00:19	0:00:20	0:00:19	0:01:45	0:01:22	0:01:05	0:02:37	0:02:29	0:02:15
T_n	0:04:37	0:02:03	0:01:52	0:01:55	0:02:13	0:02:20	0:02:39	0:02:54	0:02:57	0:03:10
T_{n63}	0:03:48	0:01:38	0:01:32	0:01:36	0:03:12	0:02:52	0:02:50	0:04:32	0:04:24	0:04:20
T_{n90}	0:05:46	0:02:44	0:02:42	0:03:10	0:04:30	0:04:10	0:04:22	0:06:18	0:06:08	0:06:12
τ	0:02:58	0:01:19	0:01:12	0:01:17	0:01:27	0:01:30	0:01:45	0:01:55	0:01:55	0:02:05



Obr. 5 Vývoj aktivní teplosměnné plochy pro deskové otopné těleso klasik 10 – 500 × 1000

Fig. 5 Progression of the active heat transfer surface of the panel radiator type klasik 10 – 500 × 1000

VÝKLAD NAMĚŘENÝCH HODNOT

Je třeba zhodnotit tzv. trend vývoje jednotlivých parametrů ve vztahu k výšce a délce otopného tělesa, přičemž v [4] je podrobné slovní hodnocení vyjádřeno rovněž velice zřetelně také graficky. Znalost v tabulce uvedených dynamických parametrů nám pomáhá lépe uchopit problematiku regulace tepelného výkonu za účelem zefektivnění provozu regulátorů, resp. otopných těles. Z hlediska metody vyhodnocení i dalšího využití jsou nejdůležitějšími parametry doba dopravního zpoždění (T_d), doba průtahu (T_p) a doba náběhu (T_n). U všech sledovaných parametrů je zcela jednoznačné, že jsou závislé především na výšce otopného tělesa a ve směru jeho délky se příliš nemění nebo jsou téměř konstantní, vyjma sektorů zahrnujících rozvodnou komoru (zde 1 až 3). Podle zjištěné doby dopravního zpoždění lze v závislosti na daném dělení plochy určit vývoj aktivní plochy za předpokladu, že jakmile dojde k počátečnímu zvýšení střední povrchové teploty sektoru minimálně o 0,1 K, je celý sektor označen jako teplo sdílející aktivní plocha. Vývoj je zobrazen na obr. 5.

Proložením odpovídající křivkou zjistíme, že za uvedeného předpokladu těleso sdílí teplo celou svou otopnou plochou po přibližně 40 sekundách od prvotního vstupu teplé vody z přívodního potrubí.

V rámci analýz bylo zkoumáno i podrobnější dělení na 18 sektorů, nicméně praktický význam pro výsledné hodnoty byl zanedbatelný, zatímco časová náročnost řešení se neúměrně zvýšila. V [4] bylo rovněž zkoumáno dvojnásobně dlouhé těleso a byla tím potvrzena silná závislost na geometrii tělesa, tzn. na jeho typu, a lze tak dále předpokládat, že pro tělesa tzv. dlouhá – tj. s poměrem délky k výšce větším než 3 – nebude zcela platit téměř výhradní závislost parametrů na výšce otopného tělesa. Je tedy třeba správně pro jednotlivá, alespoň typově odlišná otopná tělesa vyhodnotit, stanovit či zobecnit určité geometrické parametry, podle kterých bude možné predikovat vývoj aktivní plochy.

VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ

Dynamiku teplotního pole na otopném tělese lze samozřejmě provést poměrně přesně s využitím termovizní techniky. Je to však proces zdoluhavý a finančně náročný. Touto analýzou se tudíž snažíme tento proces popsat matematicky. S ohledem na zkoumaný jev, tedy průběh poměrného výkonu, lze s výhodou zavést bezrozměrný parametr vycházející ze základních zákonitostí popisujících prostup tepla přes teplosměnnou

plochu. Lze jej nazvat součinitel změny odevzdaného tepla a nabývá tvaru:

$$\varepsilon = \frac{Q_{OK}}{Q_N} = \left(\frac{\Delta t_{OK}}{\Delta t_N} \right)^n \frac{S_{OK}}{S_N} \frac{T_d + T_u}{T_n} \quad (1)$$

Je zde využito získaných hodnot z dynamické analýzy náběhu otopného tělesa, byť nyní pouze pro daný typ, a v další fázi je třeba provést jejich zobecnění tak, aby součinitel mohl být prakticky využitelný a měl vypovídající hodnotu pro náběh otopných těles. S výhodou je zde však využito teplotního exponentu otopného tělesa n , kterým lze vzorec v podstatě individualizovat pro konkrétní těleso, neboť je výrobcem tělesa vždy dán. Ve shodě s výše uvedeným můžeme rovněž konstatovat, že teplotní exponent je též závislý především na výšce otopného tělesa a jen minimálně na jeho délce (pokud nehovoříme o konvektorech). Teplotní rozdíl je pak určen aritmeticky či logaritmicky (podle teplotního podílového součinitele c) stejně jako u přepočtu tepelného výkonu otopných těles.

MODEL

Přistoupit k procesu náběhu lze však i jiným způsobem. Na základě analyzovaných hodnot, především pak vývoje aktivní plochy, je nyní vyvíjen dynamický model v prostředí MATLAB Simulink [6]. Je založen na principu základní kalorimetrické rovnice s tím, že je rovněž řešeno sdílení tepla do okolí odděleně v jednotlivých částech tělesa. V současnosti však není znám takový funkční model, který by poskytoval spolehlivé a pro regulaci použitelné výsledky pro různé druhy či typy otopných těles.

ZÁVĚR

V současnosti neexistuje jednotná spolehlivá metodika pro vyhodnocování dynamického chování různých druhů otopných těles. Cílem analýz je popsat metodiku a nalézt takový způsob určování popsaných veličin, který by byl aplikovatelný v konečném výsledku na více druhů otopných těles a napomohl tím k lepší regulovatelnosti a zvýšení efektivity provozu otopných těles. Lze samozřejmě v mnoha případech potřebné veličiny měřit, nicméně je to zdoluhavé a v případě termovizního měření i velice náročné na technické vybavení. Měření však může pomoci nalézt takové vstupy, které by umožnily matematický popis či simulaci. Dynamika otopných ploch je velice složitou záležitostí především díky jejich obrovské rozmanitosti. Existuje nepřeberné množství způsobů provedení, druhů a typů. Pravděpodobně tedy nebude možné například jedním modelem obsáhnout všechny varianty, nicméně snahou je identifikovat chování nejvíce využívaných deskových otopných těles. Jednotlivé modely, či model s různě zadanými vstupy bude třeba vždy konfrontovat s výsledkem měření.

V tomto příspěvku byl popsán postup možné analýzy dynamických hodnot na základě změřeného rozložení teplotního pole ve vztahu ke geometrii daného tělesa. Je to přístup, který by mohl v budoucnu napomoci stanovit obecné hodnoty a předpoklady alespoň pro krátká a středně dlouhá desková otopná tělesa.

Kontakt na autora: Jindrich.Bohac@fs.cvut.cz; Jiri.Basta@fs.cvut.cz

Legenda symbolů:

- c teplotní podílový součinitel [-]
- Δt_{OK} okamžitý teplotní rozdíl [K]
- Δt_N jmenovitý teplotní rozdíl [K]
- ε součinitel změny odevzdaného tepla [-]

n	teplotní exponent otopného tělesa [-]
Q_{OK}	okamžitý tepelný výkon otopného tělesa [W]
Q_N	jmenovitý tepelný výkon otopného tělesa [W]
S_{OK}	okamžitá (aktivní) teplosměnná plocha [m ²]
S_N	jmenovitá teplosměnná plocha [m ²]
T_d	doba dopravního zpoždění [s]
T_u	doba průtahu [s]
T_n	doba náběhu [s]
T_{n63}	setrvačnost náběhu 63 % [s]
T_{n90}	setrvačnost náběhu 90 % [s]
τ	časová konstanta [s]

Použité zdroje:

- [1] BAŠTA, J., ŠIMEK, J., VAVŘIČKA, R.: Dynamické chování deskových otopných těles. *Vytápění, větrání, instalace*. 2008, roč. 17, č. 3, s. 129–134. ISSN 1210-1389.
- [2] BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R., ŠOUREK, B.: Vizualizace teplotních polí otopných těles. *Vytápění, větrání, instalace*. 2005, roč. 14, č. 4, s. 186–188. ISSN 1210-1389.
- [3] BOHÁČ J.: *Dynamické chování otopných těles*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [4] BOHÁČ J.: *Dynamické chování otopných ploch ve vazbě k řízení jejich tepelného výkonu*. Praha, 2014. Studie disertační práce. ČVUT v Praze.
- [5] BOHÁČ J., BAŠTA J.: Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. *Konference vytápění Třeboň 2013*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, s. 120–124. ISBN 978-80-02-02431-6.
- [6] BOHÁČ J., BAŠTA J.: Experimentální podklady pro dynamický model chování deskového otopného tělesa. *8. Konference simulace budov a techniky prostředí IBPSA-CZ*. Praha: IBPSA-CZ, 2014, s. 101–106. ISBN 978-80-260-7209-6.
- [7] BRAUN, J., CHATURVEDI, N.: An inverse gray-box model for transient building load prediction. *HVAC and Research*. 2002, vol. 8 (1), p. 73–99.
- [8] JANČÍK L., BAŠTA J.: Posouzení dynamického chování otopných těles termografickou metodou. *5. Konference simulace budov a techniky prostředí SBTP'08*. Brno: IBPSA-CZ, 2008, s. 45–49. ISBN 978-80-254-3373-7.
- [9] JANČÍK, L., BAŠTA, J.: Setrvačnost náběhu a chladnutí otopných těles. *Vytápění, větrání, instalace*. 2009, roč. 18, č. 4, s. 154–157. ISSN 1210-1389.
- [10] TAHERSIMA, F., STOUSTRUP, J., RASMUSSEN, H., NIELSEN, P. G.: Thermal Analysis of an HVAC System with TRV Controlled Hydronic Radiator. *6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. Toronto, 2010, p. 756–761. ISBN 978-1-4244-5449-5.
- [11] XU, B., FU, L., DI, H.: Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRVs in buildings. *Energy and Buildings*. 2008, vol. 40, p. 1755–1764. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.03.004

Sníží elektromobily spotřebu energie na klimatizaci?

Ekologická hodnota elektromobilů je zatím problematickou otázkou. Sama výroba je náročnější na zdroje než výroba stávajících vozů; ke snížení skleníkového efektu by přispěla, pokud by elektrina pocházela z ekologických zdrojů. Předností elektromobilů je však skutečnost, že jejich provoz vytváří pouze 20 % tepla spalovacích motorů. Podle čínské simulační studie hunské univerzity v Čangša se v Pekingu provozem elektromobilů ochladí o 1 K. Klimatizace v budovách ochlazuje vnitřní prostory, ale teplo vydávají ven. Pokud zbavíme město spalovacích motorů, které teplotu v ulicích zvyšují, klimatizace musí méně pracovat a spotřeba energie se může snížit až o 14 mil. kWh, což odpovídá poklesu CO₂ o 10,68 t denně.

Pramen: CCI 06/2015, s. 4

(AB)

21. Mezinárodní odborný veletrh

vytápěcí, ventilační, klimatizační, měřicí, regulační, sanitární a ekologické techniky

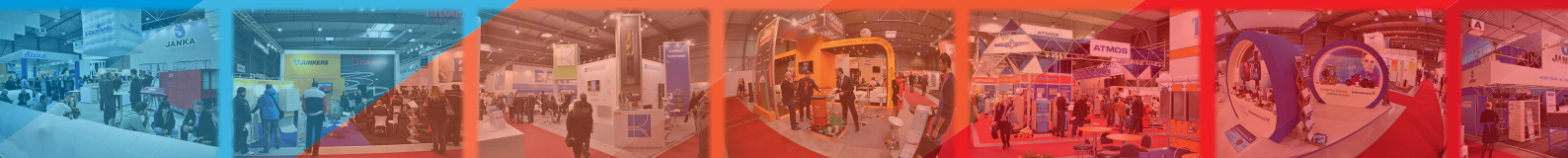
aqua THERM PRAHA

1. – 4. března 2016
PVA EXPO PRAHA

**PŘI ON-LINE REGISTRACI
VSTUPENKA ZDARMA**

www.aquatherm-praha.com

trendy • inovace • úspory energií • vše o technickém zařízení budov



Organizátor
veletrhu: **MDLEXPO S.R.O.**

Developed by **Reed Exhibitions®**
Messe Wien

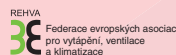
Pod záštitou:



Ministerstvo životního prostředí



Hlavní
partneři:



SPOLČNOST PRO TECHNICKÉ PROSTŘEDÍ

