

Risto KOSONEN¹,
Hannu KOSKELA²,
Pekka SAARINEN²

Analýza konvektivních proudů

An Analysis of Thermal Plumes

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Príspevek popisuje experimentálnu štúdiu konvektivných proudů nad typickými kuchyňskými zariadeniami. K analýze charakteristik týchto proudů byla použita metoda extrapolace. V různých výškách nad spotřebiči byl analyzován vliv tepelného toku na maximální rychlost a rozdíl teplot v konvektivním proudě a jeho okolí. Byl analyzován vzájemný vztah mezi tepelným tokem a tokem hybnosti spolu s tokem kinetické energie. Měření ukázalo, že maximální rychlost vzduchu zůstávala od povrchu až do výšky 2 m téměř konstantní. To znamená, že všeobecně užívaná rovnice pro termální proudy nad zdroji tepla v oblastech, kde platí úplná podobnost, neplatí v přechodové oblasti.

Klíčová slova: konvektivní proudy, větrání kuchyní, profily rychlostí a teplot

An experimental study of thermal plumes of typical kitchen appliances was conducted. In this study, an Extrapolation method was used to analyze plume characteristics. The effect of the convection load on the maximum velocity and excess temperature was analyzed at different heights above appliances. The correlation between convection load and both the momentum flux and the kinetic energy flux was analyzed. In the measurements, the maximum air velocity stayed nearly constant from the surface of the appliance up to the height of 2 m. This demonstrates that the generic plume equation derived in the region of complete flow similarity is not exactly valid in the intermediate zone.

Key words: thermal plumes, kitchen ventilation, velocity and temperature profiles

Základní teorie konvektivních proudů je známa již 60 let a stále se zdokonaluje. Základy výpočtu osové rychlosti, rozdílu teplot a dosahu proudů od bodového zdroje tepla popsali např. Popielek (1981) a Kofoed (1991). Teorie konvektivních proudů se často užívá kupříkladu u návrhů systémů zaplavovacího větrání. Pro aplikaci v praxi jsou analytické rovnice pro výpočet rychlostí, teplot a množství vzduchu v konvektivních prouděch nad bodovým a lineárním zdrojem tepla uvedeny například v Mundt (1996).

Popielek při analýze konvektivního proudů nad bodovým zdrojem tepla pracuje s předpokladem, že rychlostní a teplotní profil v proudě má přibližně tvar gaussova profilu, který aproximací aplikuje na model konvektivního proudů. V modelu zavádí parametry p a m . Parametr m nazývá faktor distribuce rychlosti a popisuje výšku rychlostního profilu. Charakterizuje také úhel rozevření proudů. Parametr p Popielek nazývá faktor distribuce teploty a má stejnou funkci pro teplotu jako parametr m pro rychlost.

Rychlostní a teplotní profil v konvektivním proudě se vyvine do tvaru gaussovy křivky až v určité vzdálenosti od zdroje. Proudění ve stoupavém kruhovém proudě lze rozdělit do tří různých oblastí, přičemž jen v poslední hlavní oblasti vyvinutého proudů profil nabývá tvaru gaussovy křivky. Stanovení hranice mezi jednotlivými oblastmi ve stoupavém proudě není jednoduché, protože změna neprobíhá skokově. Proto jsou v modelech konvektivních proudů všechny oblasti brány jako jedna a model konvektivního proudů nad zdrojem tepla je popisován jako proudění v hlavní oblasti plně vyvinutého proudů.

V předchozích studiích jsou jako zdroje tepla použity relativně malé zdroje, jako osoby, stolní lampy, počítače nebo vyhřívané válce. U komerčních kuchyňských zařízení jsou tepelné zisky mnohem vyšší (3 až 60 kW), což znamená, že rychlost a tok hybnosti jsou také mnohem větší.

V praxi je zdroj tepla zřídka bodový. K popisu zdroje konvektivního proudů se nejčastěji používá metoda virtuálního počátku, ze kterého se průtok počítá. Metoda využití pevného virtuálního počátku, jak je běžně používána v praxi, však není dostačující. Je třeba stanovit virtuální počátek pro výpočet potřebného průtoku pro každé zařízení zvlášť (Kosonen a kol. 2005).

V tomto článku jsou prezentována měření proudů nad typickými kuchyňskými zařízeními ve dvou stavech, při vaření a v klidovém stavu pouze při zapnutém zdroji tepla, která proběhla na Finnish Institute of Occupational Health (institut pro ochranu zdraví pracovníků).

Na základě těchto měření byla analyzována charakteristika proudů nad typickými kuchyňskými zařízeními. Speciální důraz je v této studii kladen na analýzu vzájemného vztahu mezi tepelným tokem konvekce a maximální rychlostí, rozdílem teplot a tokem hybnosti.

Měření se uskutečnila v testovací místnosti v laboratořích. Konstrukce sestávala z ocelového rámu o půdorysu 10 x 4 m a výšce 6 m. Místnost byla od okolí tepelně izolována polystyrenem o tloušťce 50 mm. V průběhu měření nepřesáhl teplotní rozdíl mezi průměrnou teplotou stěn testovací místnosti a teplotou okolí ve výšce 1,1 m nad zemí 2 K. Přívod vzduchu do místnosti byl rozložen mezi šest potrubních systémů s výustěmi umístěnými u podlahy, které zajistily zaplavovacím principem rovnoměrný přívod do celé místnosti a zároveň nenarušily konvektivní proudy kolem kuchyňských zařízení. Celkový průtok dodávaného vzduchu 600 l/s byl nastaven k pokrytí přísávání vzduchu do konvektivního proudů nad hranici 3 m výšky proudů nad zařízením. Odsávací mřížka byla instalována ve výšce 6 m.

Teplota přívodního vzduchu byla přibližně 20 °C. Konvektivní proudy od železných, chromovaných a plynových sporáků a indukční pánve byly zkoumány při chodu naprázdno a při vaření. Kromě toho, byl v režimu „vaření“ zkoumán ještě indukční sporák a smažicí pánev. Vaření bylo simulováno dvěma desetilitrovými hrnci s vroucí vodou. V případě indukční pánve bylo simulováno vaření (pečení) vykostěných kuřecích prsou. Na smažicí pánvi byla teplota oleje udržována na 180 °C.

Kuchyňská zařízení použitá v měření představují momentální špičku technologií používaných k vaření. Železný sporák je typicky užíván v komerčních kuchyních. Chromovaný sporák je na dotykové desce vybaven teplotním senzorem, který zlepšuje využití energie při částečném pokrytí sporáku. Mimoto je povrch desky nízkoemisivní, takže v porovnání s povrchy litých částí železného sporáku redukuje teplo vyzařené radiací. Indukční pánve má rychlou a přesnou regulaci, která udržuje povrchovou teplotu konstantní v průběhu různých podmínek vaření. Jmenovité výkony a rozměry zařízení udává tab. 1.

¹Halton Oy, Kausala 47400 Finland

²Finnish Institute of Occupational Health

Tab. 1 Popis kuchyňských zařízení, na kterých probíhal experiment

Zařízení a jeho výkon	Popis
Železný sporák 6 kW	Dva litinové pláty 500 x 800 x 950
Chromovaný sporák 6 kW	Dvě chromované plotny s regulací povrchové teploty 500x 800 x 950
Plynový sporák 5,5 kW	Dva hořáky (2 a 3,5 kW) 400 x 650 x 460
Indukční sporák 10 kW	Dvě plotny s regulací výkonu dle požadavku. 380 x 700 x 145
Indukční pánev 6 kW	Regulace el. výkonu. Nerezová ocel. 520 x 440 x 175
Smažicí pánev 6,9 kW	360 x 435 x 260

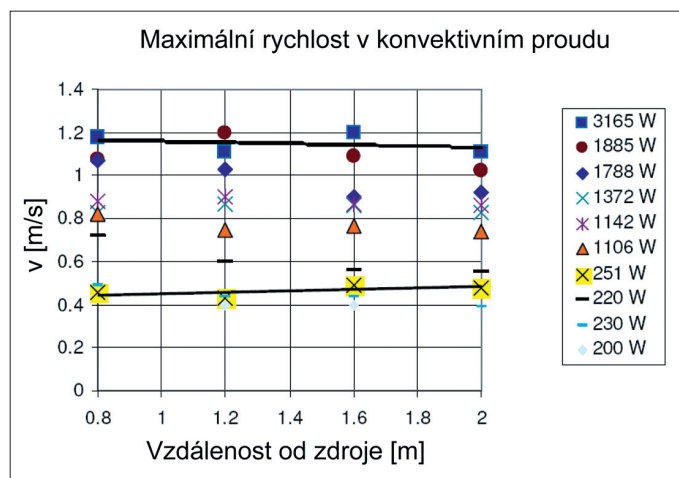
K měření rychlostí a teplot byl použit měřicí robot. Konvektivní tepelné toky byly stanoveny na základě měření rychlostí a teplot ve vodorovné rovině. Sondy byly připevněny na počítačem řízené traverzovací zařízení, které s nimi pohybovalo z bodu do bodu. Zaznamenávaly se hodnoty ve čtyřech předem zvolených rovinách, určených výškami 0,8, 1,2, 1,6 a 2,0 m od zařízení. Základní měřicí síť o rozměrech 1,1 x 1,1 m a kroku 0,1 m měla 121 měřených bodů v každé ze čtyř rovin.

Rychlost vzduchu byla měřena ultrazvukovou sondou Kaijo Denki WA-390, která má přesnost 0,02 m/s pro každou složku rychlosti. Senzory měří složky rychlosti třemi páry ultrazvukových čidel při registrování časového průběhu nadzvukových pulzů. Teplota vzduchu byla měřena termistory Fenwal s přesností 0,1 K.

V průběhu testů byl měřen aktuální výkon elektrických zařízení svorkovým ampérmetrem. Výkon plynového sporáku byl stanoven ze spotřeby plynu. Konvektivní výkon je vypočítán z měření rychlostí a teplot v konvektivním proudu. Zbylá část zisků je radiace. Rozložení celkového výkonu je uvedeno v tab. 2 a 3.

V obr. 1 je pro oba případy (běh naprázdno a vaření) uvedena maximální rychlost jako funkce vzdálenosti od zdroje. Z měření vyplynulo, že maximální rychlost neklesá jednoznačně se vzdáleností. Při relativně vysoké tepelné zátěži od zdroje je maximální rychlost okolo 1 m/s ve všech čtyřech měřících rovinách (0,8, 1,2, 1,6, 2,0 m). U nižších tepelných zisků se maximální rychlost pohybuje okolo 0,4 až 0,5 m/s.

Maximální rozdíl teplot mezi konvektivním proudem a okolním vzduchem v místnosti jako funkce tepelného toku konvekcí je zobrazen na obrázku 2. Ve výšce 0,8 m nad zařízením (zdrojem) je rozdíl teplot při tepelném toku



Obr. 1 Naměřené maximální rychlosti jako funkce vzdálenosti od zařízení (zdroje) pro různá kuchyňská zařízení a konvektivní zátěž

Tab. 2 Rozpis jednotlivých složek tepelné zátěže kuchyňských zařízení při chodu naprázdno

Zařízení	Celkový výkon [W]	Konv. výkon [W]	Radiace a zbytkový výkon [W]
Železný sporák	5170 100 %	1788 34,6 %	3382 65,4 %
Plynový sporák	4710 100 %	3165 67,2 %	1545 32,8 %
Chromovaný sporák	2496 100 %	1106 44,3 %	1390 55,7 0
Indukční soporák	872 100 %	180 20,6 0	692 79,4 %

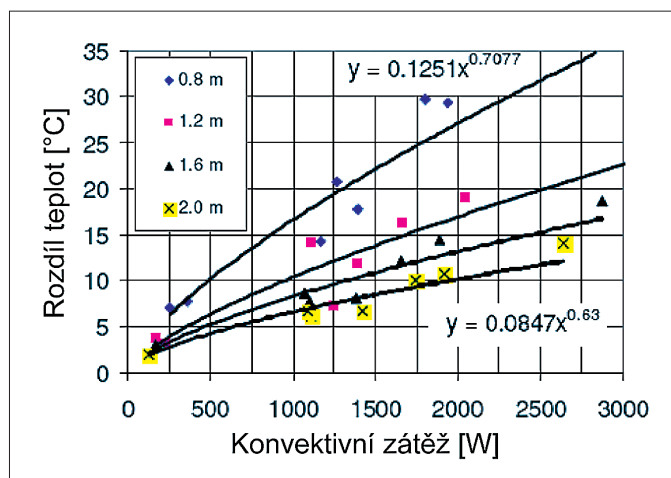
Tab. 3 Rozpis jednotlivých složek tepelné zátěže kuchyňských zařízení při vaření

Zařízení	Celkový výkon [W]	Výkon potřebný na vaření [W]	Konv. výkon [W]	Radiace a zbytkový výkon [W]
Železný sporák	5440 100 %	3570 65,6 %	1142 21 %	728 13,4 %
Plynový sporák	4625 100 %	2270 49,1 %	1885 40,8%	470 10,2 %
Chrom. sporák	6277 100%	3974 63,3 %	1372 21,9%	931 14,8 %
Indukční soporák	3690 100 %	2900 78,6 %	220 6 %	570 15,4 %
Smažicí pánev	530 100%	–	230 43,4 %	300 56,6 %
Indukční pánev	3230 100%	–	200 6,1 %	3030 93,9 %

konvekcí 2000 W okolo 30 °C. Ve výšce 2,0 m zůstává teplotní rozdíl stále okolo 10 °C.

Na obr. 3 a 4 je prezentována šířka rychlostního profilu Rv a šířka teplotního profilu Rt . Výsledky měření ukazují, že rychlostní a teplotní profil nekorelují s tepelnými zisky konvekcí. Nicméně šířka profilů roste lineárně se vzdáleností od zdroje.

Na základě měření rychlosti a teploty byly spočítány charakteristiky konvektivních proudů nad kuchyňskými zařízeními. Naměřené hodnoty vzduchu strhávaného do proudu a koeficient distribuce rychlosti a teploty jsou



Obr. 2 Maximální rozdíl teplot jako funkce konvektivní zátěže ve čtyřech vzdálenostech od zařízení (zdroje).

ukázány spolu s odpovídajícími hodnotami uvedenými různými autory v literatuře (viz tab. 4). Jsou zde prezentovány následující parametry:

- p – koeficient distribuce teploty,
- m – koeficient distribuce rychlosti,
- λ – koeficient podílu distribuce rychlosti a teploty,
- α – koeficient přisávání vzduchu do konvektivního proudu.

Lokální Archimédovo číslo Ar a poměr šířek teplotního rozdílu a rychlostního profilu λ můžeme spočítat jako:

$$A_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T_0 \cdot R_v}{v_c^2} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R_T}{R_v} \quad (2)$$

- kde
- β – součinitel teplotní roztažnosti,
 - g – gravitační zrychlení.

Koeficient rozdílu teplot p a distribuce rychlosti m můžeme spočítat explicitně ze vztahu

$$p = \frac{4}{9} \cdot Ar^{-2} \cdot \lambda^{-6} \quad (3)$$

$$m = \frac{4}{9} \cdot Ar^{-2} \cdot \lambda^{-4} \quad (4)$$

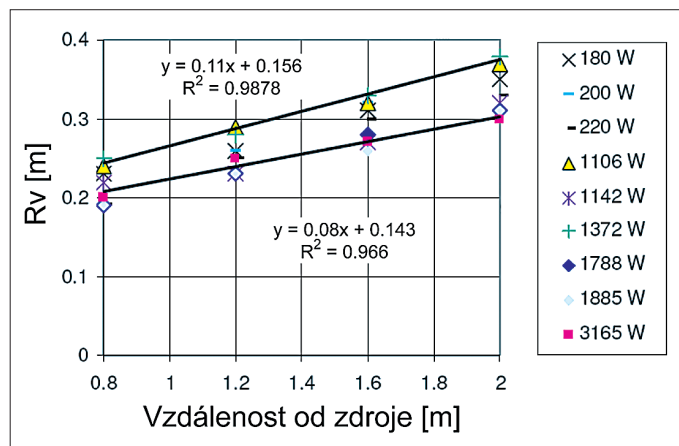
Koeficient α popisuje jak efektivní je přisávání okolního vzduchu do konvektivního proudu a lze jej spočítat z rovnice

$$\alpha = \frac{5}{9} \cdot m^2 \quad (5)$$

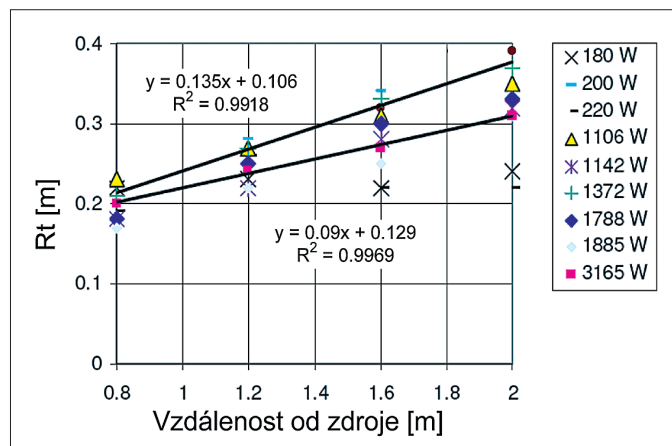
Tok hybnosti a tok kinetické energie udávají mohutnost tepelného proudu. Na obr. 5 a 6 je zobrazen graf toku kinetické energie a toku hybnosti.

Tab. 4 Parametry konvektivního proudu nad kuchyňskými zařízeními

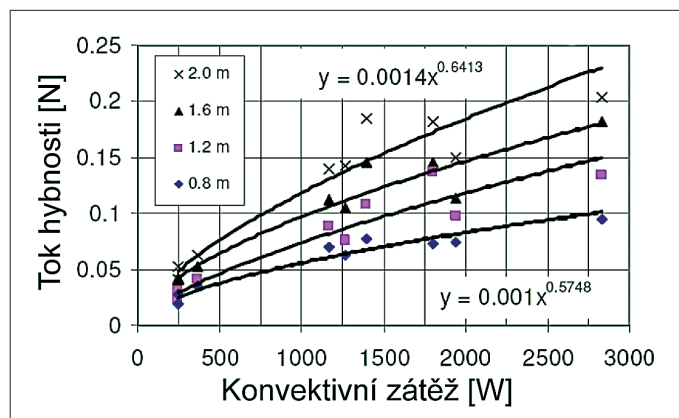
Autor	Parametry konvektivního proudu			
	α	m	p	λ
Popielek	0,036	42,5	32,8	1,14
Schmidt	0,124	45	45	1,00
Georgie	0,78	55	65	0,92
Nakagome	0,103	65	70	0,96
Shepelev	0,045	74	59	1,12
Morton	0,93	80	N/A	N/A
Rouse	0,036	96	71	1,16
Kofoed	0,080	110	115	0,98
Tato studie Chod naprázdno (ve výšce 0,8 m)	0,18-0,26	10-23	11-25	0,95-0,97
Tato studie Vaření (ve výšce 0,8 m)	0,11-0,19	19-56	26-59	0,72-0,89



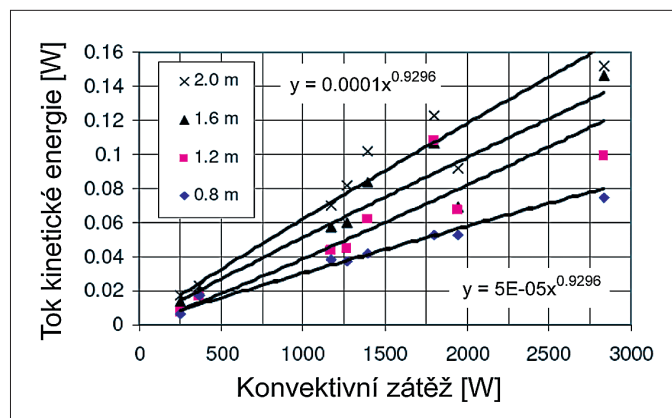
Obr. 3 Šířka rychlostního profilu jako funkce vzdálenosti od zařízení při různé konvektivní zátěži



Obr. 4 Šířka teplotního profilu jako funkce vzdálenosti od zdroje při různé konvektivní zátěži



Obr. 5 Tok hybnosti jako funkce konvektivní zátěže ve čtyřech vzdálenostech od zařízení (zdroje)



Obr. 6 Tok kinetické energie jako funkce konvektivní zátěže ve čtyřech vzdálenostech od zařízení (zdroje)

ZÁVĚR

Při běžném návrhu větrání kuchyně a všeobecně u zaplavovacího větrání je výška, ve které se rychlostní a teplotní profil počítá, vždy menší než 2 m nad zdrojem. V takové vzdálenosti ještě konvektivní proud nedosáhl třetí oblasti plně vyvinutého proudu. Proudění je stále v přechodové fázi, kde se proud vyvíjí nelineárně.

V předchozích studiích konvektivních proudů byly faktory distribuce rychlosti a teploty uvedeny jako mnohem vyšší než vyplynulo z měření uvedeném zde. Naopak koeficient přísávání vzduchu do konvektivního proudu byl v předchozích pracích mnohem menší, než bylo zjištěno měřením. Je nutno poznamenat, že tepelná zátěž od kuchyňských zařízení je mnohem větší než výkon používaný v dřívějších studiích.

Měření ukazují, že velikost tepelných zisků významně ovlivňuje úhel rozšíření proudu a koeficient přísávání vzduchu blízko zdroje tepla. Konvektivní proudy nad zdroji tepla s vysokým tepelným výkonem jsou užší a konvektivní proud indukují více vzduchu z okolí než ukazovaly předchozí studie.

Poděkování: Studii podpořil Technology Agency of Finland (TEKES). Autoři děkují panu Pasi Karhunen z Metos Oy za technické rady a zapůjčení kuchyňských zařízení pro experiment.

Příspěvek byl přednesen na Konferenci Klimatizace a větrání 2006, přeložil Ing. Viktor Zbořil.

Použité zdroje:

- [1] Kofoed, P. Thermal Plumes in Ventilated Rooms. PhD Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark 1991.
- [2] Kosonen, R., Koskela, H. and Saarinen, P. An experimental study of thermal plumes of kitchen appliances Indoor Air 2005, September 4-9 2005, Beijing China. Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.
- [3] Mundt, E. The Performance of Displacement Ventilation Systems – Experimental and Theoretical Studies, PhD Thesis, Bulletin no. 38, Building Service Engineering, KTH, Sweden 1996
- [4] Popielek, Z. Problems of Testing and Mathematical Modelling of Plumes above Human Body and other Extensive Heat Sources, A4 – series no. 54, Department of Heating and Ventilating, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 1981. ■

Recenze

□ V. Barros: **Globální změna klimatu**. 1. vydání, Praha 2006, 168 stran. Vydalo nakladatelství Mladá fronta v edici Kolumbus, Svazek 181. Ze španělského originálu El Cambio Climático Global, vydaného nakladatelstvím Libros del Zorzal v roce 2004, přeložil P. Pšenička. ISBN 80-204-1356-1.

Vincente Barros, doktor meteorologie a profesor klimatologie na Fakultě exaktních a přírodních věd Univerzity Buenos Aires, je autorem více než sta prací o klimatických problémech, polovinu z nich publikoval v mezinárodních časopisech. V roce 2001 se podílel na vypracování jedné z kapitol Třetí zprávy Mezivládní panelové diskuse o klimatických změnách. Knihu Globální změna klimatu nasměroval autor k široké veřejnosti a populární formou v ní podal teorii globálního oteplování a jeho důsledků a zmínil dohady a nejistoty, které v této problematice panují. Text knihy je členěn do jedenácti kapitol a je proložen šestadvaceti obrázky s grafy a tabulkami a doplněn barevnými snímky.

V první kapitole autor uvádí do problematiky změny klimatu a seznamuje čtenáře s tématy, které budou diskutovány v následujících kapitolách.

Druhá kapitola je věnována klimatickému systému. Jsou charakterizovány jeho jednotlivé složky a složité interakce mezi nimi.

Třetí kapitola pojednává o příčinách nestálosti klimatu. Procesy popisované v této kapitole dokazují, že klima není statické, že se mění působením přírodních vlivů v časovém měřítku od měsíců po milion let, a že k přírodním příčinám klimatických změn se v posledních staletích přidaly vlivy vyvolané lidskou činností.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na skleníkové plyny. Je v ní popsán transport a životnost skleníkových plynů, geochemický cyklus a bilance hlavních skleníkových plynů, emise a koncentrace v atmosféře i antropogenní zdroje emisí. V současné době se na emisích skleníkových plynů podílí energetika 48 %, a to především spalováním fosilních paliv, 24 % tvoří emise fluorchloridů uhlovodíků (tvrdé freony), 13 % je přičítáno odlesňování, 9 % je způsobeno zemědělskou činností a zbytek, tj. 6 %, pochází z manipulace s odpady a z některých průmyslových procesů.

V páté kapitole seznamuje autor s vývojem klimatického systému v minulosti a historií klimatických změn od vzniku Země až po 19. století. Na příkladech uvádí, jaké dopady hospodářské, sociální a politické měly změny klimatu na rozvoj civilizací.

V šesté kapitole podává autor řadu důkazů, že od konce 19. století došlo během tzv. průmyslové éry k výraznému oteplení a že probíhající oteplování ve 20. století se v posledních 30 letech zrychlovalo přispěním lidských aktivit. Průměrná globální

teplota vzduchu u povrchu Země vzrostla za posledních 150 let o 0,6 °C, průměrná hladina moře se na různých pobřežích zvedla o 10 až 25 cm.

Kapitola sedmá je zaměřena na hledání odpovědi na otázku, jak se budou klimatické změny vyvolané lidskými aktivitami vyvíjet ve 21. století a kde se nejvíce projeví. Odpověď dává tzv. globální klimatické modely, které matematicky na velkých počítačích simulují převážnou část fyzikálních procesů v hydrosféře, atmosféře, pedosféře, kryosféře a nově i v biosféře s emisními scénáři koncentrace oxidu uhličitého. Předpokládáné zvýšení globální teploty o 2 až 3 °C po roce 2060 by znamenalo zvýšení průměrné hladiny moře o 50 až 60 cm a řadu krizových situací v hydrologii, ekologii, zemědělství, zdravotnictví, mj. by podnítilo obrovské migrace, které by mohly vyvolat nejrušnější konflikty.

V kapitole osmé autor reaguje na skutečnost, že zmírnit expanzi lidských aktivit, které produkují značnou část emisí skleníkových plynů, je obtížné, protože jsou přímo spjaty s energetikou a výrobou potravin, a probírá nové technologické alternativy, jež by umožňovaly snížení emisí oxidu uhličitého, aniž by musely být omezeny činnosti, které dnes tyto emise produkují. Globální snižování spotřeby se totiž ve stávajících podmínkách a při způsobu chování větší části globální společnosti jeví jako neproveditelné. Snižování emisí je však ekonomicky omezeno.

V deváté kapitole autor diskutuje o zájmech jednotlivých odvětví, zájmech ideologických a národních. Vlády většiny států jsou ve svém postoji ke zmírnění klimatické změny ovlivněny především ekonomickými zájmy.

Desátá kapitola připomíná četná mezinárodní vyjednávání v otázkách změn klimatu, která vyústila v Rámcovou úmluvu OSN o změně klimatu v r. 1992 a v Kjótský protokol v r. 1997 a zmiňuje i činnost Mezivládního panelu pro změnu klimatu a Mezinárodního fondu pro životní prostředí.

V závěrečné kapitole vidí autor jako skutečné řešení technologické inovace, které by umožnily oddálit možnou krizi klimatu. Podstata tím ale nebude vyřešena, dokud nebudeme schopni čelit dvěma nejdůležitějším příčinám krize klimatu: demografické explozi a růstu nadbytečné spotřeby. Chování globální společnosti považuje autor za důsledek slepé ekonomické dynamiky a varuje, že nebude-li dnešní společnost schopna jiného pojetí než striktně ekonomického, mohla by se stát obětí své vlastní dynamiky.

Kniha V. Barrose je doplněna *Doslovem*, v němž je podána charakteristika podnebí České republiky a informace o poznatcích z výzkumu změn klimatu pro naše území. Doslov napsal předseda České bioklimatologické společnosti RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, ČSČ.

(Ptáková)