



BULLETIN

ČESKÁ SPOLEČNOST
PRO MECHANIKU

2·2015

Česká společnost pro mechaniku

Asociovaný člen European Mechanics Society (EUROMECH)

Předseda Prof. Ing. Miloslav Okrouhlík, CSc.

Redakce časopisu Ing. Jiří Dobiáš, CSc.
Dolejšková 1402/5, 182 00 Praha 8
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.
tel. 266 053 973, 266 053 063
fax 286 584 695
e-mail: jdobias@it.cas.cz

Jazyková korektura Mgr. Petra Hesová

Tajemnice sekretariátu Ing. Jitka Havlínová
Sekretariát Dolejšková 1402/5, 182 00 Praha 8
tel. 266 053 045, tel./fax 286 587 784
e-mail: csm@it.cas.cz

Domovská stránka <http://www.csm.cz>
IČO Společnosti 444766

Bulletin je určen členům České společnosti pro mechaniku.

Vydává Česká společnost pro mechaniku, Dolejšková 1402/5, 182 00 Praha 8 - Libeň
Bulletin České společnosti pro mechaniku je vydáván s finanční podporou Akademie věd ČR.

Vychází: 3x ročně

Místo vydávání: Praha

Den vydání: 1. září 2015

ISSN 1211-2046

Evid. č. UVTEI 79 038

MK ČR E 13959

Tiskne: ČVUT Praha,
CTN – Česká technika,
Nakladatelství ČVUT,
Thákurova 1, 160 41 Praha 6

BULLETIN

2'15

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO MECHANIKU

OBSAH

| | |
|--|----|
| F. Maršík: Entropie v otevřených systémech | 2 |
| Kronika | 29 |
| Očekávané akce | 48 |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| F. Maršík: Entropy in Open Systems | 2 |
| Chronicle | 29 |
| Prospective Events | 48 |

Entropie v otevřených systémech

Entropy in Open Systems

František Maršík

Summary *Thermodynamics of open systems offers a new concept for description of real material objects including the living systems. The II. Law of Thermodynamics can be interpreted as evolution law of all material systems, which are in interaction with their surroundings. The most important quantity is the entropy which is defined by the balance law of entropy. The production of the entropy gives information about the processes into the systems. The convexity of the entropy informs us about the stability of the system states. Under appropriate outer conditions the fluctuations can drive the systems to instability. The consequence is the creation or decay of new dissipative structures. When the new dissipative structure appears the system is going further from the thermodynamic equilibrium to a new stable state. However, if the dissipative structure disappears the systems tend to the thermodynamic equilibrium, which from the biological point of view equals death.*

Motto:

Living matter evades the decay to equilibrium.

Organization maintained by “order” from the environment.

Erwin Schrödinger [22]

Úvod

Po celou dobu své existence si lidstvo klade otázku vratnosti procesů, které kolem něj probíhají. Velice brzy lidé zjistili, že každý *následek má svoji příčinu*. Tato zkušenost byla formulována v zákonu *kauzality*. Když připouštíme (alespoň v materiálním světě), že všechny procesy probíhají kauzálně, tak nás napadá otázka predikce

následků. S touto otázkou souvisí i problém *determinismu*, tedy přesnosti, se kterou lze budoucí stavy sledovaných systémů určit. Mlčky předpokládáme, že každý člověk (pozorovatel na kterémkoliv místě) by měl dospět ke stejným závěrům, tedy ke stejné predikci. Tento požadavek nazýváme *objektivitou*.

Všechny uvedené vlastnosti vývoje a jeho predikce jsou formulovány v zákonech bilance *hmotnosti a energie* a v zákonech *rovnováhy sil a jejich momentů*. Tyto zákony nám sice definují velikosti (kvantitu) hmotnosti a energie, síly (hybnosti) a jejich momentů, nedávají nám ale dostatek informací o všech veličinách, které byly k jejich definici potřeba. Jako příklad uveďme tepelný a difúzní tok, rychlosti chemických reakcí anebo relace mezi tlakem a hustotou, popř. tenzorem napětí a deformacemi tělesa či rychlostních polí. Všechny tyto vztahy (někdy nazývané *konstitutivní vztahy* či *stavové rovnice*) určují konkrétní vlastnosti materiálových systémů. Bez jejich znalosti je predikce jejich vývoje nemožná. Analýzou a co nejpřesnější formulací těchto konstitutivních vztahů se zabývá *termodynamika* [17], [16], [10], [9], [12].

V současné době je termodynamika chápána jako fyzikální disciplína, která vychází z obecných zákonitostí přeměny energie a látky a vyvozuje z nich důsledky. Jde o dialektiku *látky a pole*. Zkoumá reálná tělesa - termodynamické systémy (dále jen systémy), které se skládají z velkého počtu vzájemně na sebe působících (interagujících) částí – podsystemů (např. atomů, molekul apod.) Pro účely mechaniky kontinua je základním termodynamickým podsystemem *materiálový bod*. Příkladem jsou pevné těleso, tekutina, biologický jedinec či jeho část, ekologický systém apod. Interakcí rozumíme všechny známé způsoby působení těles v přírodě. Jde především o výměnu všech druhů energií, výměny hybnosti a látky. Základními pojmy termodynamiky jsou *teplota* a *entropie*. Veličiny kvantifikující tyto pojmy jsou spolu úzce propojeny a jen pomocí nich lze formulovat základní zákony termodynamiky:

I. Zákon termodynamiky: *Energii systému lze změnit výměnou tepla, mechanické, elektrické či chemické práce (v jakékoli kombinaci) s okolím. Celková energie*

(součet všech známých forem energií) uzavřeného izolovaného systému se nemění, jednotlivé formy energie se pouze mezi sebou přeměňují.

II. Zákon termodynamiky: *Neexistuje takový termodynamický proces, jehož jediným výsledkem by bylo předávání nějakého množství tepla získaného od chladnějšího systému (tělesa) systému (tělesu) teplejšímu.* Kvantitativně je formulován jen pomocí entropie; entropie uzavřeného izolovaného systému jen roste, až dosáhne svého maxima v tzv. *termodynamické rovnováze*. V otevřených (biologických) systémech může být entropie trvale udržována na hodnotách daleko od svého maxima. Biologický systém, který dosáhl maxima entropie (termodynamické rovnováhy), je mrtvý (neinteraguje s okolím a nepřeměňuje žádnou z forem energie).

Jak je patrné z formulace II. Zákona termodynamiky, lze jej interpretovat dvěma na sobě nezávislými tvrzeními [17]:

- i) *Časová nevrátlost procesů:* V systému, který neinteraguje s okolím, probíhají všechny procesy tak, že se systém nemůže sám vrátit do původního stavu.
- ii) *Největší pravděpodobnost stavu:* Každý systém zaujímá takový stav, který je v daných podmínkách nejpravděpodobnější.

Ani v jednom z těchto tvrzení nevystupuje explicitně entropie, každé z nich však vystihuje jeden z hlavních důsledků tohoto zákona. Chování všech reálných systémů je implicitně popsáno entropií, a proto byla entropie, a jistě i bude, používána k charakterizaci chování někdy i nemateriálních systémů mimo termodynamiku (mimo fyziku).

Obecně můžeme entropii (slovo řeckého původu “*εντροπια*”, které znamená změna uvnitř a značíme S) definovat jako *makroskopickou veličinu charakterizující kolektivní vlastnosti hmoty, přičemž je určitou mírou nahodilosti v evoluci systému*. Vývoj pojmu entropie a jeho interpretace jsou patrné z Tab. 1.

| | | | |
|----------------|------|--|---|
| R. Clausius | 1865 | $dS \geq \frac{dQ}{dT}$ | fenomenologický přístup, dQ teplo dodané do systému [2] |
| J.W. Gibbs* | 1884 | $S = k \ln \Gamma$ | pravděpodobnostní přístup, systém zaujímá stav s maximálním počtem stavů Γ , což je současně stav nejpravděpodobnější [8] |
| L. Boltzmann | 1886 | $S = -k \int f \ln f d \mathbf{v} $ | mikroskopický přístup, $f(\mathbf{v})$ rozdělovací funkce rychlosti \mathbf{v} , k je Boltzmannova konstanta; koncepce molekulárního chaosu [1] |
| A. Einstein | 1910 | $d^2S < 0$ | fluktuace okolo rovnovážného stavu entropii soustavy snižují (podmínka maxima entropie)[7] |
| L. Onsager* | 1933 | $P(S) = \sum_i J_i X_i > 0, J_i = \sum_j L_{ij} X_j$ | produkce entropie $P(S)$ je vždy kladná a termodynamické toky J_i , např. elektrický tok a tepelný tok, závisejí na termodynamických silách X_i , např. na gradientu el. potenciálu a gradientu teploty; existence křížových jevů L_{ij} , např. termoelektrický jev [19] |
| E. Schrödinger | 1945 | $-\mathcal{J}(S) = P(S) > 0$ | biologický systém je v termodynamické nerovnováze, ve které je udržován záporným tokem entropie [22] |
| I. Prigogine | 1947 | $\frac{dP(S)}{dt} \geq 0$ | formulace principu minimální produkce entropie pro systémy v dynamické rovnováze [10] |
| M.Eigen* | 1957 | $\min P(S)$ | pomocí principu minima produkce entropie ukázal, že vzájemnou kompeticí (soutěžením) složitějších molekul při recyklaci se ustálil jejich počet na konečném čísle (všechny bílkoviny na Zemi se skládají pouze z 20 aminokyselin)[6], [23] |
| I. Prigogine* | 1977 | | teorie otevřených systémů; otevřené systémy (zahrnuje i biologické a ekologické systémy) jsou ve stabilní dynamické rovnováze s maximální termodynamickou účinností (vztaženo k jejich okolí) [20] |

Tab. 1. Časový vývoj definice a interpretace entropie S [JK^{-1}]; * byla udělena Nobelova cena za chemii.

Shrnutí různých formulací definice entropie, především ve statistické fyzice, teorii přenosu informací a teorii pravděpodobnosti je uvedeno v článku J. Rosenberga [21].

I cannot read any significance into a physical world when it is held before me upside down. For that reason I am interested in entropy not only because it shortens calculations which can be made by other methods, but because it determines an orientation which cannot be found by other methods.

Nemohu pochopit význam jakéhokoliv pojmu (čehokoliv) ve fyzikálním světě, pokud jsem nepochopil význam jeho opaku. Z těchto důvodů se zajímám o entropii nejen proto, že zkracuje výpočty, ty mohou být provedeny i jinými metodami, ale protože určuje orientaci (směr), která nemůže být jinými metodami stanovena.

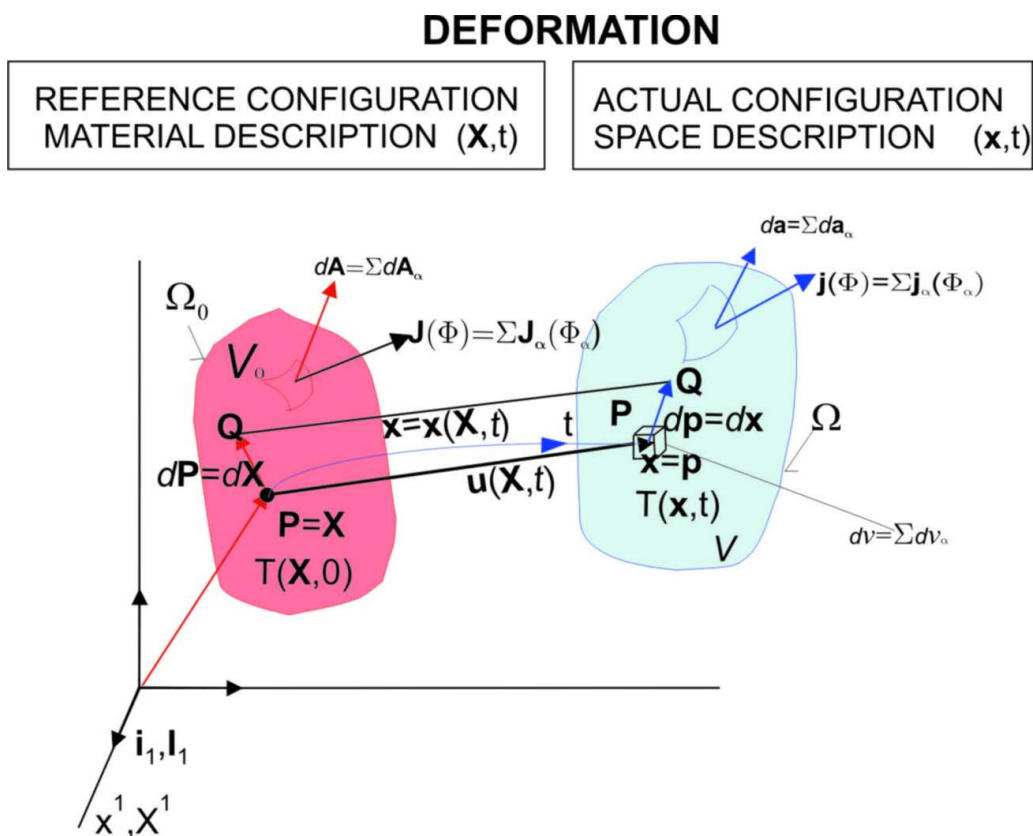
A. S. Eddington [5]

1. Bilance entropie-entropie systému v okolí rovnovážného stavu

Studiem konkrétních disipativních systémů (diferenciálních rovnic) lze ukázat, že disipativnost procesů v systému a stabilita jeho stavu spolu souvisí stejně tak, jako souvisí časová nevratnost vývoje systému s jeho existencí (trváním). Pro konzervativní idealizované (nedisipativní) systémy se počet stavů, ve kterých se mohou nacházet, s vývojem (s nárůstem času) nemění a lze tedy jejich vývoj v čase jednoznačně obrátit. Naproti tomu u reálných systémů se počet možných stavů s vývojem zmenšuje a jde-li navíc o systém nelineární, dochází při vývoji i k nestabilitám. Zmenšení počtu stavů systému nedovoluje jednoznačně určit jeho stav počáteční, což je zásadním projevem časové nevratnosti vývoje systému [18]. Na rozdíl od systémů termodynamicky rovnovážných, kde makroskopický stav odpovídá maximálnímu počtu stavů mikroskopických mezi kterými neexistují korelace, v nerovnovážných systémech tomu tak není. V nich je díky interakci s okolím udržována nerovnováha, která se projevuje snížením počtu mikroskopických stavů mezi nimiž jsou trvale udržovány korelace [20]. Typickými příklady jsou např. čerpání laseru (korelace mezi dvěma energetickými hladinami) či elektrické potenciály na buňkách v živé tkáni (korelace mezi koncentracemi iontů sodíku, draslíku, chlóru a vápníku tak, aby potenciál vnitřku buňky byl

v klidovém stavu záporný, přibližně -70 mV)[16].

Uvedené úvahy lze vhodně kvantifikovat pomocí následujících veličin: celková entropie systému S , tok entropie do systému $\mathcal{J}(S)$ a produkce entropie systémem $P(S)$. Změna stavu systému je charakterizována časovou derivací entropie \dot{S} , interakce systému s prostředím tokem entropie $\mathcal{J}(S)$ a vnitřní procesy v systému produkcí entropie $P(S)$. Konkrétní tvar těchto veličin lze nalézt jedině pomocí dobře definovaných a dobře měřitelných veličin vystupujících v zákonech bilance (většinou bilance hmotnosti, hybnosti, momentu hybnosti, energie apod.) v závislosti na uvažované struktuře systému, viz Obr. 1.1.



Obr. 1.1. Obecné schéma bilance extenzivních veličin Φ . Pro formulaci II. Zákona termodynamiky je rozhodující bilance entropie $\Phi = S$.

Výchozí evoluční zákon systémů můžeme psát ve tvaru bilance entropie

$$\dot{S} - \mathcal{J}(S) = P(S) \geq 0, \quad (1.1)$$

přičemž pro nedisipativní (idealizované) procesy platí $P(S) = 0$ a pro procesy disipa-

tivní (reálné) $P(S) > 0$. Pro systém o objemu V a ohraničený plochou Ω platí

$$S = \int_V \rho s dv, \quad \mathcal{J}(S) = - \int_{\Omega} \mathbf{j}_{eq}(S) d\mathbf{a}, \quad P(S) = \int_V \sigma(S) dv, \quad (1.2)$$

kde postupně s [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] je specifická entropie, ρ [kg m^{-3}] hustota, $\mathbf{j}_{eq}(S)$ [$\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$] hustota toku entropie a $\sigma(S)$ [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] hustota produkce entropie. Tvar produkce entropie závisí na tvaru zákonů bilance hmoty, hybnosti, momentu hybnosti, bilanci mechanické energie, vnitřní energie a na definici entropie. Nejčastější je lokálně rovnovážná Gibbsova definice entropie (3.12), jíž pak odpovídá produkce entropie ve tvaru

$$P(S) = \int_V \sigma(S) dv, \quad \text{pro} \quad \sigma = \sum_i J_i X_i \quad (1.3)$$

s konkrétní formou termodynamických sil X_i a termodynamických toků J_i z Tab. 2.

| Termodynamický tok J_i | Termodynamická síla X_i |
|--|---|
| vedení tepla \mathbf{j}_q | $\nabla \left(\frac{1}{T} \right)$ |
| thermodifúze $\mathbf{j}_{D_\alpha} h_\alpha$ | $\nabla \left(\frac{1}{T} \right)$ |
| koncentrační difúze \mathbf{j}_{D_α} | $\left(\frac{\nabla \mu_\alpha}{T} \right)$ |
| elektrický tok $\mathbf{j}_{e,\alpha}$ | $\frac{\mathbf{F}_\alpha}{T} = - \frac{z_\alpha F}{M_\alpha T} \nabla \phi$ |
| visko-plastické procesy | |
| - pro pevné látky $\mathbf{t}_{dis}(T, \mathbf{d}, \dot{\mathbf{t}}_{dis})$ | $\frac{\mathbf{d}}{T}$ |
| - pro tekutiny p_{dis} | $\frac{\text{div} \mathbf{v}}{T}$ |
| - viskozita $\mathbf{t}_{dis} - \sum_\alpha \rho_\alpha \mathbf{v}_{D_\alpha} \otimes \mathbf{v}_{D_\alpha}$ | $\frac{(\circ) \mathbf{d}}{T}$ |
| bobtnání a smršťování \mathbf{v}_{D_α} | $\mathbf{t}_{dis \alpha} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right)$ |
| kapilární tok \mathbf{j}_{D_c} | $\frac{\mathbf{\Gamma}_c}{T} = + \frac{1}{T} \nabla (\sigma \cdot a)$ |
| chemické reakce a fázové přechody $\dot{\zeta}_\rho$ | $\frac{A_\rho}{T}$ |

Tab. 2. Nezávislé termodynamické síly a toky nerovnovážné termodynamiky při Gibbsově definici entropie pro lokálně rovnovážné stavy (3.12).

Podle Boltzmannova vztahu je entropie systému mírou pravděpodobnosti jeho stavu, přičemž stavy s vyšší entropií jsou i stavy pravděpodobnější, viz (2.4). Stav s maximální entropií je potom i stavem nejpravděpodobnějším a všechny reálné systémy se

nacházejí právě v tomto stavu, viz II. Zákon termodynamiky, tvrzení ii). Důsledky pro evoluci biologických systémů jsou shrnuty v kap. 6.

2. Vztah mezi fluktuacemi a změnou entropie

V předchozím úvodu bylo stručně naznačeno, že stabilitu časového vývoje termodynamického systému lze charakterizovat nějakou podmínkou stability (Ljapunovovou funkcí, viz kap. 9. v [17]). Ačkoliv zatím neumíme odvodit tvar této podmínky teoreticky ze vzájemného působení molekul a atomů, lze z vnějšího makroskopického chování tvar takové funkce alespoň odhadnout. Musí především souviset s pravděpodobností změny makroskopického stavu systému a v jeho bodech nestability vzhledem k fluktuacím makroskopických veličin musí změnit znaménko. Tím se výběr veličin (funkcí, funkcionalů) velmi zúží. Jako výchozí bod bude sloužit vztah pro pravděpodobnost fluktuace okolo rovnovážného stavu systému. Předpoklad rovnovážnosti stavu není nutný, pokud budeme předpokládat, že vztah pro pravděpodobnost fluktuace (2.4) platí i dále od stavu lokální rovnováhy.

Pravděpodobnost fluktuace makroskopické veličiny je spojena s celkovou změnou entropie systému ΔS při fluktuaci pomocí Einsteinovy formule [14]

$$\text{Pr} \sim \exp \frac{\Delta S}{k}, \quad (2.1)$$

kde k je Boltzmannova konstanta. Formuli (2.1) můžeme jednoduše odvodit z následujících představ. Je-li Γ_{eq} počet všech mikroskopických realizací systému v rovnovážném stavu, je jeho maximální entropie rovna

$$S_{eq} = k \ln \Gamma_{eq}. \quad (2.2)$$

Jestliže nějakým způsobem vyvedeme soustavu z rovnovážného stavu, klesne počet jeho mikrostavů na Γ_{noneq} a tím i jeho entropie klesne na hodnotu S . K vychýlení z rovnováhy dochází často samovolně vlivem vnitřních procesů jako je tepelný pohyb molekul v důsledku chemických reakcí a podobně. Analogicky vztahu (2.2) platí

$$S = k \ln \Gamma_{noneq}. \quad (2.3)$$

Jestliže zavedeme pravděpodobnost této fluktuace mikroskopického stavu jako poměr, tj.

$$\text{Pr} = \frac{\Gamma_{noneq}}{\Gamma_{eq}},$$

pak užitím rovnic (2.2) a (2.3) dostáváme vztah

$$\text{Pr} = \exp \frac{S - S_{eq}}{k} = \exp \frac{\Delta S}{k}, \quad S - S_{eq} = dS_{eq} + \frac{1}{2}d^2S_{eq} + \dots, \quad (2.4)$$

kde $\Delta S < 0$ je celková změna entropie způsobená fluktuací. Vzhledem k tomu, že entropie dosahuje v rovnováze svého lokálního maxima, je $dS_{eq} = 0$ a $\frac{1}{2}d^2S_{eq} < 0$.

Vztah (2.1) budeme používat hlavně pro systémy, ve kterých platí předpoklad lokální termodynamické rovnováhy. Je však třeba poznamenat, že entropie má svůj fyzikální význam i v lokálně nerovnovážných stavech. Tento další význam souvisí se stabilitou stavu systému, jak je patrné ze vztahu (3.6). Je třeba mít na paměti, že časové měřítko fluktuací vznikajících samovolně v systému je mnohem menší než změny vyvolané vnějšími okrajovými podmínkami, viz Obr. 4.1. Lze předpokládat, že podmínka $\frac{1}{2}d^2S_{eq} < 0$ zahrnuje i vliv korelací mezi fluktuacemi. V rovnovážných stavech (na úrovni molekul a atomů i v lokálně rovnovážných stavech) jsou korelace vyloučeny. Víme však, že v reálných systémech korelace existují a hrají dominantní úlohu v oblastech nestability. Všechny tyto úvahy směřují ke stanovení velikosti ΔS ve vzorci (2.1) i pro otevřené systémy.

3. Termodynamická definice entropie

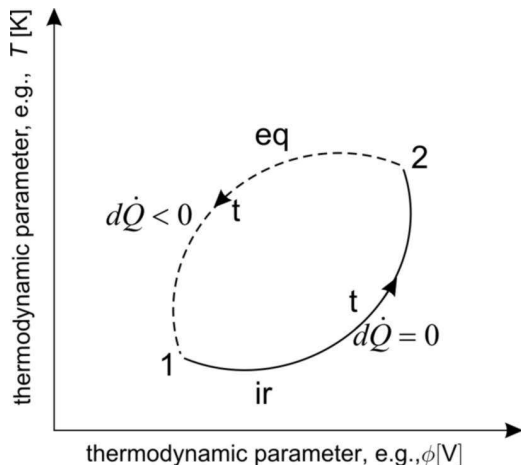
Nejdůležitější veličinou termodynamiky je **entropie**, která je však definována implicitně a ještě nerovnicí

$$\oint \frac{dQ}{T} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{Q}}{T} dt \leq 0 \quad \text{Clausiova nerovnost.} \quad (3.1)$$

Tato nerovnice vyjadřuje empirický fakt, že pro každý cyklický proces probíhající v termodynamickém systému o objemu V , ve kterém je možno měřit teplotu T , zůstává nějaké množství tepla, které je nutno ze systému odvést ($dQ > 0$ je teplo dodané). Každý cyklický proces si lze představit složený z části nevratné (reálné- irreverzibilní) a části

vratné (ideální-rovnovážné), viz Obr. 3.1.,

$$\oint \frac{dQ}{T} = \underbrace{\int_1^2 \frac{dQ}{T}}_{\text{ir} \Leftrightarrow dQ=0} + \underbrace{\int_2^1 \frac{dQ}{T}}_{\text{eq} \Leftrightarrow T dS_{\text{eq}}=dQ} = S(1) - S(2) \leq 0 \quad \text{nebo} \quad S(2) \geq S(1). \quad (3.2)$$



Obr. 3.1. Entropie je definována jen pomocí vratné části procesu “eq”. V nevratné části procesu “ir” dochází k jejímu nárůstu i bez interakce s okolím (bez výměny tepla, hmoty, energie, hybnosti apod.) Pro realizaci uzavřeného cyklu je vždy třeba nějaké množství tepla odvést. Nejčastějšími termodynamickými parametry jsou teplota T , tlak p , objem V , popř. specifický objem v , entropie s , elektrický potenciál ϕ , koncentrace w_α apod.

V rovnováze dosahuje entropie systému svého lokálního maxima, viz Obr. 4.1.

Jak patrně z Obr. 3.1. je entropie dS_{eq} definovaná pomocí výměny tepla dQ , a to jen pro rovnovážné (vratné) procesy. U vratných procesů nezáleží na způsobu (cestě) jakým bylo dosaženo stavu “1” ze stavu “2”, viz Obr. 3.1. Tuto vlastnost splňují funkce, jejichž diferenciál je *totálním diferenciálem*. Požadujeme, aby dS_{eq} byl totálním diferenciálem svých nezávisle proměnných, např. vnitřní energie U a objemu V , viz definici (3.12), a podobně v lokálním popisu (3.13), viz např. [13]. Všechny reálné systémy se nacházejí v nerovnovážném stavu, obecně s nějakou entropií S . Stav systému s entropií S_{eq} je pouze stavem hypotetickým, viz dále.

Názorným příkladem uzavřeného cyklu je nabíjení a vybíjení akumulátoru. Akumulátor nabíjíme z napětí (potenciálu) ϕ_1 na napětí ϕ_2 . Do akumulátoru jsme uložili náboj velikosti $Q_2 - Q_1 = A_{\text{in}}(t_2 - t_1)$, který odpovídal nabíjecímu proudu A_{in} po dobu $t_2 - t_1 = \Delta t$. Podobně akumulátor vybijeme z napětí ϕ_2 na napětí ϕ_1 s vybíjecím proudem A_{out} za čas $t_3 - t_2 = \Delta t$. Při obou procesech však došlo k zahřívání akumulá-

toru. Napětí akumulátoru na konci procesu je stejné jako na počátku, avšak jeho teplota je různá. Do akumulátoru jsme dodali energii $(\phi_2 - \phi_1)A_{in}(t_2 - t_1)$ a odvedli energii $(\phi_1 - \phi_2)A_{out}(t_3 - t_2)$. Ze zkušenosti víme, že množství odvedené elektrické energie je vždy menší než množství energie dodané, tudíž $(\phi_2 - \phi_1)\Delta t(A_{in} - A_{out}) = \Delta\mathcal{E} > 0$. S ohledem na zákon zachování energie (I. Zákon termodynamiky) se energie $\Delta\mathcal{E}$ přeměnila na teplo, tj., $\Delta Q = \Delta\mathcal{E}$. Jak při nabíjení tak i vybíjení se akumulátor ohříval, tudíž jeho teplota stoupala. Abychom na konci procesu dostali stejné podmínky jako na počátku, tj. realizovali *uzavřený cyklus*, musíme akumulátor chladit, tj. odvádět teplo, viz Obr. 3.1. Teplo, které je důsledkem nevratných procesů (ohmické ztráty, chemické reakce na povrchu elektrod) musí být pro realizaci rovnovážného (vratného) procesu odvedeno, tj. $dQ < 0$, srovnej s Clausiovou nerovností (3.1).

Rozviňme entropii celé soustavy a celkový tok entropie do Taylorovy řady kolem rovnovážného stavu S_{eq}

$$S = S_{eq} + (\delta S)_{eq} + \frac{1}{2}(\delta^2 S)_{eq} + \dots, \quad (3.3)$$

$$\mathcal{J}(S) = \mathcal{J}(S_{eq}) + \underbrace{\delta\mathcal{J}(S_{eq}) + \delta^2\mathcal{J}(S_{eq}) + \dots}_{\mathcal{J}(S_{eq})}. \quad (3.4)$$

Znak δ zde označuje diferenciál, kterým je vyjádřena i malá fluktuace. Celkový tok entropie jsme rozdělili na tok $\mathcal{J}(S_{eq})$ udržující rovnovážný stav a tok $\mathcal{J}(S)$, který systém z rovnovážného stavu vychyluje. Jejich interpretace bude zřejmá dále. Derivujme vztah (3.3) podle času (časová změna entropie), abychom mohli využít bilanční rovnice entropie otevřené soustavy (1.1)

$$\dot{S} = \dot{S}_{eq} + \delta\dot{S}_{eq} + \frac{1}{2}\delta^2\dot{S}_{eq} + \dots. \quad (3.5)$$

S ohledem na rovnici (3.4) lze bilanci entropie formálně upravit do tvaru

$$\underbrace{\dot{S}_{eq} - \mathcal{J}(S_{eq})}_{=0 \text{ rovnovážný stav}} = \underbrace{-\delta\dot{S}_{eq} - \frac{1}{2}\delta^2\dot{S}_{eq} + \mathcal{J}(S) + P(S)}_{\rightarrow 0 \text{ nerovnovážený stav}}. \quad (3.6)$$

Levá strana této rovnice definuje **rovnovážný stav** a rovnovážnou entropii S_{eq} a pravá strana popisuje změnu entropie v **nerovnovážném stavu**, (přesněji v okolí rovnovážného

stavu) a poskytuje informaci o *stabilitě rovnovážného stavu*. Rovnovážný (referenční) stav je definován podmínkou

$$\dot{S}_{eq} = \mathbf{J}(S_{eq}) \quad \text{v rovnovážném (stacionárním) stavu} \quad (3.7)$$

a jeho stabilita je zajištěna podmínkou

$$\frac{1}{2} \overline{\delta^2 \dot{S}_{eq}} = P(S) + \mathcal{J}(S_{eq}) - \overline{\delta \dot{S}_{eq}} \geq 0. \quad (3.8)$$

Termodynamické (fyzikální) zdůvodnění platnosti podmínky rovnovážného stavu (3.7) a podmínky stability (3.8) je uvedeno v kap. 4. Fyzikální oprávnění podmínky (3.8) má důvod v podmínce stability fluktuací (2.4), viz Obr. 4.1. Jestliže fluktuace zanedbáme, tj. položíme $\frac{1}{2} \overline{\delta^2 \dot{S}_{eq}} = 0$, pak podmínka (3.8) je vztahem pro bilanci entropie pro nerovnovážný stav (1.1), kde jsme položili $\overline{\delta \dot{S}_{eq}} = \dot{S}$. Vzhledem k tomu, že rovnovážný stav se mění s časem mnohem pomaleji (časové měřítko fluktuací na úrovni molekul a atomů je mnohem kratší, gradienty všech parametrů jsou zanedbatelné), lze předpokládat, že velikost časových derivací jednotlivých členů ve vztahu (3.6) je různá, např. $\dot{S}_{eq} \ll \overline{\delta \dot{S}_{eq}}$. Bez ohledu na tyto předpoklady lze obecný zákon bilance entropie (1.1) psát ve tvaru

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d}{dt} S_{eq} + \frac{d}{dt} \delta S_{eq} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \delta^2 S_{eq} = \mathbf{J}(S_{eq}) + \mathcal{J}(S) + P(S), \quad (3.9)$$

který použijeme k definici rovnovážné entropie (pro rovnovážné stavy) (3.11). Potom lze bilanci entropie (3.9) upravit

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d}{dt} \delta S_{eq} = \mathcal{J}(S) + P(S) \quad \text{pro} \quad \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \delta^2 S_{eq} \rightarrow 0 \quad (3.10)$$

a dostáváme její obvyklý tvar (1.1).

Pro rovnovážný systém je definována pouze rovnovážná entropie vztahem

$$\frac{d}{dt} S_{eq} = \mathbf{J}(S_{eq}) = \int_{\Omega} \mathbf{j}_{eq}(S) d\mathbf{a} = \frac{1}{T} \frac{dQ}{dt}, \quad \text{přičemž} \quad P(S_{eq}) = \int_V \sigma(S) dv = 0 \quad (3.11)$$

a $\dot{Q} = dQ/dt$ je množství tepla dodávané do systému rovnovážnými procesy. Vztah (3.11) je *definice rovnovážného stavu systému*. Takové procesy, právě tak jako sám

rovnovážný stav, jsou prakticky nereálné a slouží jen jako referenční pojmy (veličiny) k popisu reálných systémů. V těchto rovnovážných procesech je čas jen parametrem změny a nijak nesouvisí s časem biologickým (časem vnímaným lidským vědomím), protože jde o procesy vratné a časová derivace ve vztahu (3.11) jen symbolizuje, že každá změna musí v “nějakém čase” probíhat. Tato rovnice je také Clausiovou definicí entropie $dS_{eq} = \frac{dQ}{T}$, viz vztah (3.2), a je obvykle uváděn v tzv. Gibbsově tvaru [8] [9], [13], [16]

$$dS_{eq}(U, V) = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T}dV - \sum_{\alpha} \frac{\mu_{\alpha}}{T}dN_{\alpha} \quad \text{při} \quad P(S_{eq}) = 0 \quad (3.12)$$

pro celý rovnovážný systém objemu V a podobně

$$ds(u, \rho) = \frac{du}{T} + \frac{p}{T}d\left(\frac{1}{\rho}\right) - \sum_{\alpha} \frac{\mu_{\alpha}}{T}dw_{\alpha} \quad \text{při} \quad P(S) \geq 0 \quad (3.13)$$

pro lokálně rovnovážný systém – materiálový bod (vztaženo na 1 kg). Korelace “uvnitř” materiálového bodu jsou rovněž zanedbány. Nenulová produkce entropie ve tvaru (1.3) je způsobena jen “nerovnováhou” mezi materiálovými body, viz Tab. 2. Všechny extenzivní veličiny popisující směsi závisí na hmotnostním zlomku

$$w_{\alpha} = \frac{\rho_{\alpha}}{\rho}, \quad \text{pro} \quad \rho_{\alpha} = M_{\alpha}c_{\alpha}, \quad \rho = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha}, \quad v = \frac{1}{\rho} = \sum_{\beta} w_{\beta}v_{\beta}, \quad (3.14)$$

kde N_{α} [kmol] je celkový počet molů v objemu V , ρ_{α} [kg/m³] hustota, c_{α} [kmol/m³] molární koncentrace a M_{α} [kg/kmol] molekulová hmotnost chemické komponenty α .

Chemický potenciál značíme μ_{α} [J/kmol] pro globální popis a $\mu_{\alpha} \rightarrow \mu_{\alpha}/M_{\alpha}$ [J/kg] pro lokálně rovnovážný popis. Vyjadřuje energii vzájemného působení (energetickou vazbu) podsystémů (atomů, molekul apod.)

$$\mu_{\alpha} = u_{\alpha} - \left(\frac{\mathbf{t}_{el}}{\rho}\right) : (\rho v_{\alpha} \mathbf{e}) - Ts_{\alpha} \quad (= \bar{\mu}_{\alpha}(T, \mathbf{t}_{el}) + RT \ln w_{\alpha}) \quad \text{pro pevné látky,} \quad (3.15)$$

$$\mu_{\alpha} = u_{\alpha} + pv_{\alpha} - Ts_{\alpha} \quad (= \bar{\mu}_{\alpha}(T, p) + RT \ln w_{\alpha}) \quad \text{pro ideální tekutiny,} \quad (3.16)$$

kde $\bar{\mu}_{\alpha}(T, \mathbf{t}_{el})$ a $\bar{\mu}_{\alpha}(T, p)$ jsou referenční chemické potenciály při elastickém napětí \mathbf{t}_{el} , popř. tlaku p a teplotě T . Takto definované veličiny jsou použity pro vyjádření termodynamických sil a toků v Tab. 2.

Definice entropie (3.12) ve tvaru

$$TdS_{eq}(U, V) = dQ = dU + dW = dU + pdV - \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} dN_{\alpha}, \quad (3.17)$$

kde dW je mechanická energie, na kterou se část tepla přeměnila. Člen dW zahrnuje i energii chemickou, popř. elektrickou ze systému vystupující. Kvantitativně je tato definice entropie ekvivalentní zákonu zachování energie pro celý systém. Analogicky je i definice (3.13) bilancí (zachováním) energie pro materiálový bod. Tyto definice entropie jsou tudíž alternativním vyjádřením I. Zákona termodynamiky. Evoluci materiálových systémů popisuje až II. Zákon termodynamiky ve formulaci i) a ii).

4. Stabilita rovnovážného systému

Vztahy (3.12) a (3.13) jsou definice entropie pouze v rovnovážném, či lokálně rovnovážném stavu. Nerovnovážné stavy můžeme popisovat jen pomocí její odchylky δS_{eq} , viz vztah (3.8). Časovou změnu globální entropie (1.1) lze díky definici rovnovážného stavu (3.11) upravit do tvaru vhodného k popisu *nerovnovážných systémů*

$$\dot{S} = \frac{d}{dt} \delta S_{eq} = \mathcal{J}(S_{eq}) + \int_V \sigma(S) dv \quad \left(-\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \delta^2 S_{eq} \rightarrow 0 \right). \quad (4.1)$$

Formálně se neliší od obvyklé bilance entropie (1.1), ale interpretace toku a produkce jsou odlišné. Ve formulaci (4.1) vyjadřuje $\mathcal{J}(S_{eq})$ tok entropie plochou Ω při vychýlení systému z rovnovážného stavu. Jde o konduktivní tok tepla vlivem vedení a o difúzní tok hmoty – výměna produktů a substrátů, které jsou nutné pro průběh chemických reakcí apod. Tento tok vypočteme z okrajových podmínek definujících činnost konkrétního systému (energetické zařízení, chemický reaktor apod.) V knize [18] je ukázáno, že celková produkce entropie $P(S) > 0$ je generována jen při přenosu energie a hmoty a ne při samotné přeměně netepelných forem energie mezi sebou, např. chemické na elektrickou a naopak, chemické na mechanickou, či potenciální energie na kinetickou (pokud není uvažováno tření).

Všechny nerovnovážné procesy jsou obsaženy v členu $\sigma(S) > 0$, který značí hustotu produkce entropie v důsledku nerovnovážných dějů probíhajících v soustavě.

V případě lokální termodynamické rovnováhy (3.13) je produkce entropie způsobená nerovnováhou mezi materiálovými body a je rovna $P(S) > 0$, viz Tab. 2. Tato produkce zajišťuje stabilitu stavu, takže pro systém v dynamické rovnováze (tj. $\mathcal{J}(S) = 0$) můžeme předpokládat $-\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\delta^2 S_{eq} = P(S) > 0$, viz Obr. 4.1. U složitějších systémů při velkém množství vzájemně propojených procesů neznáme často konkrétní tvar produkce entropie (příkladem mohou být neznámé degradační procesy, metastabilní stavy chemických reakcí a fázových přechodů apod.). Jejich existence je však v členu $\frac{d}{dt}\delta^2 S_{eq}$ charakterizujícím odchylky od rovnovážné entropie S_{eq} zahrnuta. Pak můžeme tento člen interpretovat jako dosud “neznámou” – *dodatečnou* – produkci entropie. Tuto dodatečnou produkci entropie (tepla) spojíme s disipativními (obecně relaxačními) procesy, které nejsou popsány termodynamickými silami a toky, viz Tab. 2., a které se ještě neprojevily na velikosti toku entropie na hranici systému. Může zahrnovat i vliv dosud neznámých korelací v interakci podsystémů. Tvar hustoty produkce entropie a hustoty toku entropie závisí (je poplatný) na konkrétním tvaru zákonů bilance všech relevantních veličin. Jejich obecnější tvar lze nalézt např. v knihách [9], [10], [16], [17] a dalších.

Výše uvedená tvrzení jsou alternativním vyjádřením **Braunova- Le Châtelierova principu**: *Odchylka (vnější zásah), která naruší rovnovážný (referenční) stav, vyvolá v systému takové disipativní procesy, které budou vliv (i velikost) této odchylky oslabovat* [13], [10], [17].

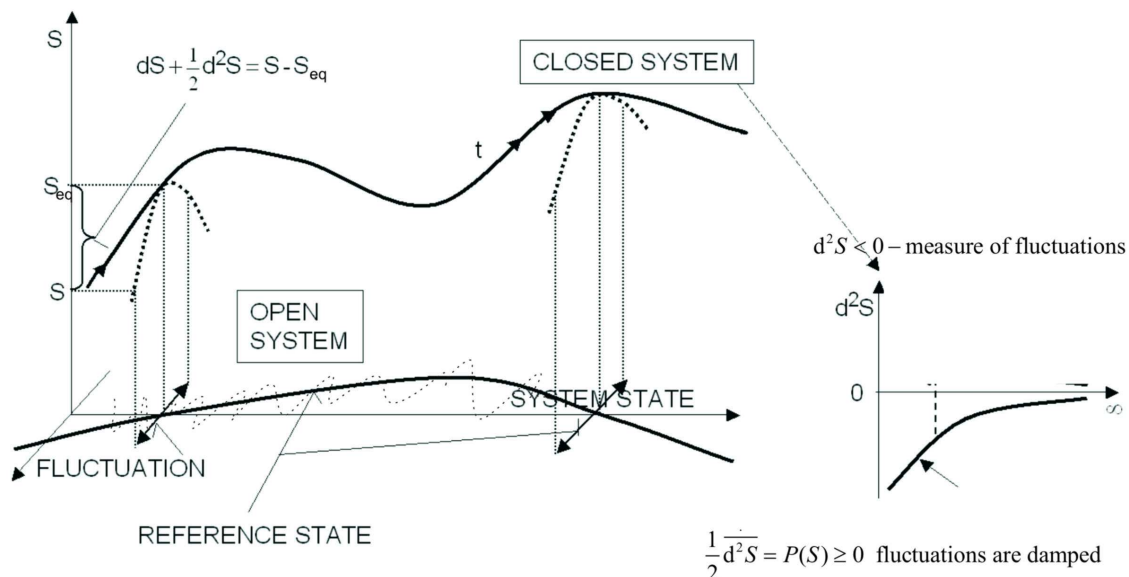
Reálný tok entropie je vždy způsoben gradienty odpovídajících veličin (teploty, tlaku, koncentrace apod) a jeho obvyklý tvar je např. [10], [9]

$$\mathcal{J}(S_{eq}) = - \int_{\Omega} \left[\frac{\mathbf{j}_q}{T} - \sum_{\alpha=1}^r \left(\frac{\rho_{\alpha} \mu_{\alpha} \mathbf{v}_{D\alpha}}{T} \right) \right] d\mathbf{a}. \quad (4.2)$$

Za předpokladu, že se systém nachází v ustáleném stavu (steady state), tj. $\dot{S} = \overline{\delta S}_{eq} = 0$, je podle bilance entropie (4.1) a podmínky stability (3.8) časová derivace

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\delta^2 S)_{eq} = \int_V \sigma(S) dv + \mathcal{J}(S_{eq}) \geq 0 \quad (4.3)$$

rovná disipaci vyjádřené produkcí entropie a je ovlivněná vnějším tokem entropie. Vnější tok entropie může vliv disipace oslabit natolik, že se systém může stát nestabilním, tj. entropie přestává být lokálně konvexní funkcí, viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1. Entropie tvoří v případě stabilního vývoje konvexní plochu nad všemi uvnitř probíhajícími procesy. Stabilitu stavů (vývoje) zajišťuje produkce entropie $P(S) > 0$. Porovnej s Obr. 4.2.

Ukázali jsme, že Clausiovu definici entropie lze interpretovat jako nutnou podmínku lokálního extrému entropie a podmínku stability (3.8) lze pro izolovaný systém ($\mathcal{J}(S_{eq}) = 0$) interpretovat jako podmínku útlumu fluktuací, viz Obr. 4.1.,

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\delta^2 S)_{eq} = \int_V \sigma(S) dv = P(S) \geq 0. \quad (4.4)$$

Připomeňme ještě klasické Gibbsovo odvození termodynamických podmínek stability [14], které plyne okamžitě integrací podmínky (4.4) podle času. Dostáváme nerovnost

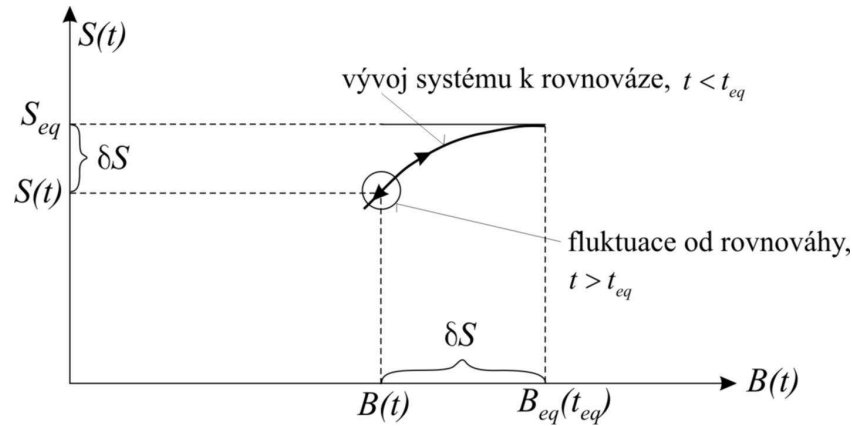
$$\frac{1}{2} (\delta^2 S)_{eq} = \int_{t_{eq}}^{t_{eq} + \Delta t} P(S) dt = \Delta_{ir} S \geq 0, \quad (4.5)$$

ze které plyne, že odchylka od rovnovážného stavu (fluktuace) nemůže nerovnost (4.5) splňovat, protože entropie dosáhla svého maxima právě v rovnovážném stavu. Fluktuace v rovnovážném stavu entropii soustavy snižují, a proto platí obrácená nerovnost,

viz Obr. 4.2.,

$$\frac{1}{2}(\delta^2 S)_{eq} = \Delta_{ir}S \leq 0. \quad (4.6)$$

Pro malé Δt platí přibližně $\Delta_{ir}S \doteq P(S)\Delta t \leq 0$. Protože je produkce entropie $P(S) > 0$, musí být $\Delta t < 0$. Tudiž systém se fluktuací od rovnovážného stavu vrací do své minulosti. Podmínka (4.6) je nazývána *zobecněnou podmínkou stability rovnovážného stavu* [10].



Obr. 4.2. Znázornění stability rovnovážného systému. $B = (U, V, \dots)$ – makroskopický stav systému; δB , δS – fluktuace stavu a entropie, které způsobují jakési “omládnutí” systému; t_{eq} – čas, ve kterém dosáhl systém rovnováhy.

Uvážíme-li, že v systému probíhají disipativní procesy, tj. že platí $dS = (d_{eq}S + d_{ir}S)$ a $d_{ir}S = dS - \frac{dQ}{T} \geq 0$ (klasická formulace II. Zákona termodynamiky), lze pomocí I. Zákona termodynamiky ve tvaru $dQ = dU + pdV$ odvodit vztah

$$Td_{ir}S = TdS - dU - pdV > 0. \quad (4.7)$$

Jestliže soustava směřuje k rovnováze (Obr. 4.2.), platí nerovnost (4.7) a v rovnováze je $d_{ir}S = 0$. Fluktuace od rovnovážného stavu v izolované rovnovážné soustavě nemůže splnit podmínku (4.7) (v rovnováze dosáhla entropie maxima). Odtud vyplývá, že nemohou-li fluktuace vyhovovat podmínce (4.7), musí splňovat podmínku $Td_{ir}S < 0$, neboli podmínku

$$\delta U + p\delta V - T\delta S > 0. \quad (4.8)$$

Vztah (4.8) představuje klasickou Gibbsovu-Duhemovu podmínku stability rovnovážného stavu.

II. Zákon termodynamiky (4.4), definice rovnovážného stavu (3.11) a zobecněná podmínka stability (4.6) jsou schématicky znázorněny na Obr. 4.2. Z něj je patrné, že vztah (4.6) je vlastně podmínka pro maximum funkce v bodě B_{eq} , a že tedy fluktuace δB entropie soustavy skutečně snižuje (viz také vztah (2.1)).

5. Důsledky podmínek termodynamické stability pro neživé otevřené systémy

Ukážeme, jak lze podmínek termodynamické stability použít ke stanovení vlastností materiálních systémů. Vyjdeme ze vztahu pro rozdělení pravděpodobností fluktuací veličin b_i kolem rovnovážného stavu $b_{i,eq}$ (2.3)

$$\text{Pr} \sim \exp \left[-\frac{(b_i - b_{i,eq})^2}{2\beta_i} \right] \sim \exp \left(\frac{d^2 s}{2R} \right). \quad (5.1)$$

Vzhledem k tomu, že jde o normální (Gaussovo) rozdělení, je střední kvadratická odchylka veličiny b_i rovna $\overline{(b_i - b_{i,eq})^2} = \beta_i$. Vyjádříme nyní podmínku (4.6) explicitně pro případ lokálně rovnovážného stavu (3.13), viz např. [14], [10], [16]. Totéž platí i pro případ globálních (integrálních) veličin (3.12). R [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] je plynová konstanta. Po několika úpravách dostaneme vztah pro druhý diferenciál entropie

$$\delta^2 s = \delta \left(\frac{1}{T} \right) \delta u + \delta \left(\frac{p}{T} \right) \delta \left(\frac{1}{\rho} \right) - \sum_{\alpha=1}^r \delta \left(\frac{\mu_\alpha}{T} \right) \delta w_\alpha, \quad (5.2)$$

který je možno dále upravit (pro $v = 1/\rho$) na kvadratickou formu

$$\delta^2 s = -\frac{1}{T} \left[\frac{c_v}{T} (\delta T)^2 + \frac{\rho}{\chi} (\delta v_{w_\alpha})^2 + \sum_{\alpha=1}^r \left(\frac{\partial \mu_\alpha}{\partial w_{\alpha'}} \right)_{T,p,w_\alpha} \delta w_\alpha \delta w_{\alpha'} \right] < 0. \quad (5.3)$$

Z ní můžeme usuzovat na stabilitu reálných systémů. Zde c_v je specifické teplo při konstantním objemu a diferenciál měrného objemu při konstantním chemickém složení je δv_{w_α} a je roven

$$\begin{aligned} \delta v_{w_\alpha} &= \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{p,w_\alpha} \delta T + \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{T,w_\alpha} \delta p, \\ \chi &= -\rho \left(\frac{\partial(1/\rho)}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho c_T^2} > 0. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Veličina χ je koeficient izotermické stlačitelnosti a c_T je izotermická rychlost zvuku. S ohledem na (5.1) můžeme nalézt střední hodnoty fluktuací teploty, hustoty a koncentrací

trací. Lokálně rovnovážný systém (v mechanice kontinua je jím materiálový bod) je stabilní, jestliže v každém jeho bodě platí

$$\overline{(\delta T)^2} = \frac{RT^2}{c_v}, \quad c_v > 0 \quad \text{podmínka termické stability,} \quad (5.5)$$

$$\overline{(\delta v_{w_\alpha})^2} = \frac{RT}{\rho^2 c_T^2}, \quad c_T^2 > 0 \quad \text{podmínka mechanické stability,} \quad (5.6)$$

$$\sum_{\alpha, \alpha'}^r \left(\frac{\partial \mu_\alpha}{\partial w_{\alpha'}} \right)_{T, p, w_{\alpha'}} \delta w_\alpha \delta w_{\alpha'} > 0 \quad \text{podmínka stability difúze a} \quad (5.7)$$

$$\overline{(\delta w_\alpha)^2} = RT \left(\frac{\partial \mu_\alpha}{\partial w_\alpha} \right)_{T, p}^{-1} = RT \left(\frac{\partial w_\alpha}{\partial \mu_\alpha} \right)_{T, p} = w_\alpha > 0 \quad \text{fluktuace koncentrace}$$

(částic) je rovna koncentraci, viz (3.16).

Tyto nerovnosti ukazují na hlubší souvislosti mezi reálnými vlastnostmi systému a podmínkou stability (4.6).

Omezená velikost fluktuací teploty (5.5) vede k podmínce pro specifická tepla, tj. $c_v > 0$, $c_p > 0$ a nakonec k důležité relaci $c_p = c_v + \frac{9T\alpha_T^2}{\rho\chi}$, kde $3\alpha_T = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ je koeficient objemové teplotní roztažnosti. V tomto tvaru platí jen pro plyny, kdežto pro pevné látky je uvedena v [17].

Velký význam pro studium nestabilit má podmínka (5.6), která je převedena na podmínku pro izotermickou rychlost zvuku $c_T^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T$. V případech, kdy je derivace tlaku podle hustoty záporná, dochází k nárůstu fluktuací hustoty, což je doprovázeno nestabilitou. Typickým případem je fázový přechod v tekutinách (vypařování, exploze plynem přesycené kapaliny, kondenzace), popř. porušení pevného materiálu (vznik trhlin). Pro Hookův materiál platí podmínky stability ve tvaru $E > 0$, $-1 < \sigma < 0.5$, kde E je Youngův modul pružnosti a σ je Poissonovo číslo. Kladná hodnota E je spojena s rychlostí šíření podélných zvukových vln v pevném tělese a je rovna $c_T^2 = E/\rho$. Záporné σ je pozorováno u polymerních materiálů a u materiálů s tvarovou pamětí, např. Nitinolu.

Mimořádný význam má podmínka stability směsi (5.7). Může jít jak o různé

chemické složky (jejich atomy či molekuly jsou rozlišitelné), tak i o částice stejného druhu (potom částice ve stejném energetickém stavu jsou nerozlišitelné). Využitím formule ii) II. Zákona termodynamiky lze stanovit počet částic N_k v energetickém stavu U_k s degenerací G_k [14]

$$N_k = \frac{G_k}{\exp\left(\frac{U_k - \mu}{kT}\right) \pm 1}, \quad \text{–pro bosony, +pro fermiony.} \quad (5.8)$$

Jestliže je energie částice mnohem větší než energie vzájemných vazeb, tj. $U_k \gg \mu$, přechází (5.8) na

$$N_k = G_k \exp\left(\frac{\mu - U_k}{kT}\right) \quad \text{Boltzmannovo rozdělení.} \quad (5.9)$$

Střední velikost fluktuací vypočteme podle vztahu (5.7), kde koncentrace nahradíme počtem částic N_k a v systému o konstantním objemu $V = konst$ odvodíme z definice entropie (3.12) (analogicky definici (3.13)) podmínku stability (5.7) ve tvaru

$$\overline{(\Delta N_k)^2} = \overline{(N_k - N_{k,eq})^2} = \overline{N^2} - N_{k,eq}^2 = kT \left(\frac{\partial N_k}{\partial \mu}\right)_T > 0, \quad (5.10)$$

kde k je Boltzmannova konstanta. Tato podmínka dává následující důležité relace

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial N_k}{\partial \mu}\right)_T &= \frac{\overline{(\Delta N_k)^2}}{kT} = N_k \left(1 \mp \frac{N_k}{G_k}\right), \quad \text{+pro bosony, –pro fermiony,} \\ &= N_k \quad \text{Boltzmannovo rozdělení.} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Tento vztah pro bosony odvodil A. Einstein a použil pro stanovení fluktuací fotonů v podmínkách záření absolutně černého tělesa popsané Planckovým vyzařovacím zákonem [7]. Nerovnost (5.10) je významná při studiu mísení různých látek včetně jejich interakcí a při fázových přechodech.

6. Důsledky podmínek termodynamické stability pro biologické otevřené systémy

Živé biologické systémy jsou v dynamické rovnováze. *Dynamickou rovnováhu* definujeme podmínkou konstantní celkové entropie $\dot{S} = 0$. Systém je trvale udržován ve stacionárním nerovnovážném stavu [16]. K udržení nerovnovážného stavu plyne

z bilance entropie (1.1) nutnost existence nenulového záporného toku entropie

$$-\mathcal{J}(S) = P(S) > 0 \text{ nerovnováha zajištěna jen díky interakci s okolím [22], [20].} \quad (6.1)$$

Takový systém je obecně materiálovým systémem a platí pro něj I. Zákon termodynamiky (energie spotřebovaná se rovná energii vydané) včetně zákona zachování hmoty a ostatních zákonů bilance.

U živých systémů je stabilita jejich existence častěji nazývána *imunitou* (či odolností vůči nemocem, obranyschopností u ekologických či společenských systémů apod.) Z hlediska existence biologického systému má imunita stejný význam jako stabilita stavu. Jde o zachování systému v příslušném nerovnovážném stavu (6.1).

Stav dynamické rovnováhy označíme indexem “*o*” a budeme ho považovat za jakýsi *stav referenční* a budeme vyšetřovat jeho stabilitu vůči odchylkám (fluktuacím) v nějakém čase $t = t_o$. Tudíž referenční stav systému v *dynamické rovnováze* je charakterizován konstantní entropií $\dot{S}\Big|_o = 0$, tj. $S(t_o) = S_o = \text{konst.}$ Její hodnota je s ohledem na (1.1) určena rovnicí

$$-\mathcal{J}(S_o) = P(S_o) \geq 0. \quad (6.2)$$

Vidíme, že systém interaguje s prostředím – je nekonzervativní – takže $\mathcal{J}(S) \neq 0$ a jeho entropie je přesto konstantní. Aby byla uvedená rovnováha stabilní je třeba, aby jakákoliv fluktuace v systému vzniklá buď spontánně či zanesená zvenku (tato fluktuace entropii systému může jen snížit, protože celková entropie je na lokálním maximu) byla eliminována (vyrušena) doprovodnými disipativními procesy uvnitř systému (analogie s rovnovážným stavem, viz Obr. 4.2.). Důsledkem disipativního procesu je opětné zvýšení entropie zpět k hodnotě S_o . Provedeme-li rozvoj entropie v čase $t = t_o$, pak je její hodnota v nějakém blízkém čase t rovna

$$S(t) - S_o = \dot{S}_o(t - t_o) + \ddot{S}_o \frac{(t - t_o)^2}{2} + \dots = \ddot{S}_o \frac{(t - t_o)^2}{2} + \dots < 0 \quad \text{ve stabilním stavu.} \quad (6.3)$$

Podmínkou stability je opět znaménko druhé časové derivace entropie, tj. $\ddot{S}_o < 0$. Jde o

stejnou podmínku jako při vyšetřování stability rovnovážného stavu (3.8). V kombinaci této podmínky s rovnicí bilance celkové entropie (1.1) dostáváme *podmínku stability otevřených systémů*

$$\ddot{S}_0 = \dot{\mathcal{J}}(S_o) + \dot{P}(S_o) < 0 \text{ stabilní vývoj (nebo } > 0 \text{ nestabilní vývoj)}. \quad (6.4)$$

Znaménko $<$ platí v případě, kdy systém zaujímal stav s entropií v daných podmínkách maximální, tj. $S_o = S_{max}$. Jakákoliv odchylka od maxima entropie systému jen snižuje. Postačující podmínka stability tohoto stavu je s ohledem na (6.4)

$$-\dot{\mathcal{J}}(S_o) > \dot{P}(S_o). \quad (6.5)$$

Z této nerovnice plyne, že otevřený systém je stabilní, jestliže časová změna záporného toku entropie je větší než časová změna produkce entropie. Tok entropie do systému je obvykle definován vztahem (4.2) a skládá se z toku tepla a difúzních toků různých chemických komponent (pro biologický systém je to využitelná potrava). Dynamický stav (6.2) pro biologický systém, např. lidské tělo, můžeme psát ve zjednodušeném tvaru

$$-\dot{\mathcal{J}}(S_o) = - \int_{\Omega} \frac{-\mathbf{j}_q}{T} d\mathbf{a} - \int_{\Omega} \sum_{\alpha=1}^r \left(\frac{\rho_{\alpha} \mu_{\alpha} \mathbf{v}_{D\alpha}}{T} \right) d\mathbf{a} = - \frac{\dot{\overline{\Delta Q}}}{T_{\text{okolí}}} + \frac{\dot{\overline{\Delta G}}}{T_{\text{těla}}} = P(S) > 0. \quad (6.6)$$

Protože při integraci přes povrch systému používáme vnější normálu je $\dot{\overline{\Delta Q}} > 0$ pokud bylo povrchem přivedeno více tepla než odvedeno (jde o teplo dodané) a $\dot{\overline{\Delta G}} > 0$ jestliže část Gibbsovy entalpie byla v těle spotřebována. Chemické reakce doprovázející trávení musí probíhat spontánně, a proto jejich Gibbsova entalpie musí být záporná. Jinými slovy potrava musí být stravitelná. Nejčistší forma energie (potravy), kterou může lidský organismus přijímat formou infúze, je glukóza. Spolu s dalšími látkami (solemi, proteiny, aminokyselinami apod.) může být dodávána přímo do krve. 1 mol glukózy ($C_6H_{12}O_6$) má hmotnost 180 g/mol. Při aerobním spalování (při dýchání) je Gibbsova entalpie glukózy 2880 kJ/mol a Gibbsova entalpie produktů komplexního řetězce reakcí, které z organismu odcházejí, 1740 kJ/mol. Pro potřeby tělesných funkcí (především udržení iontové nerovnováhy na membránách buněk a tvorba proteinů,

kteře neprobíhají samovolně) se vytvoří 38 molů ATP (Adenosintrifosfát je “palivem” pro chemické reakce, které neprobíhají spontánně, tj. s $\Delta G > 0$) z Gibbsovy entalpie o velikosti $\Delta G = 1140 \text{ kJ/mol}$, která se pro tyto účely v těle spotřebovává.

Z bilance celkové energie (3.17 pro izotermický systém ($dU = 0$)), který nekoná mechanickou práci ($pdV = 0$), např. na jednotce intenzivní péče, vypočteme spotřebu glukózy

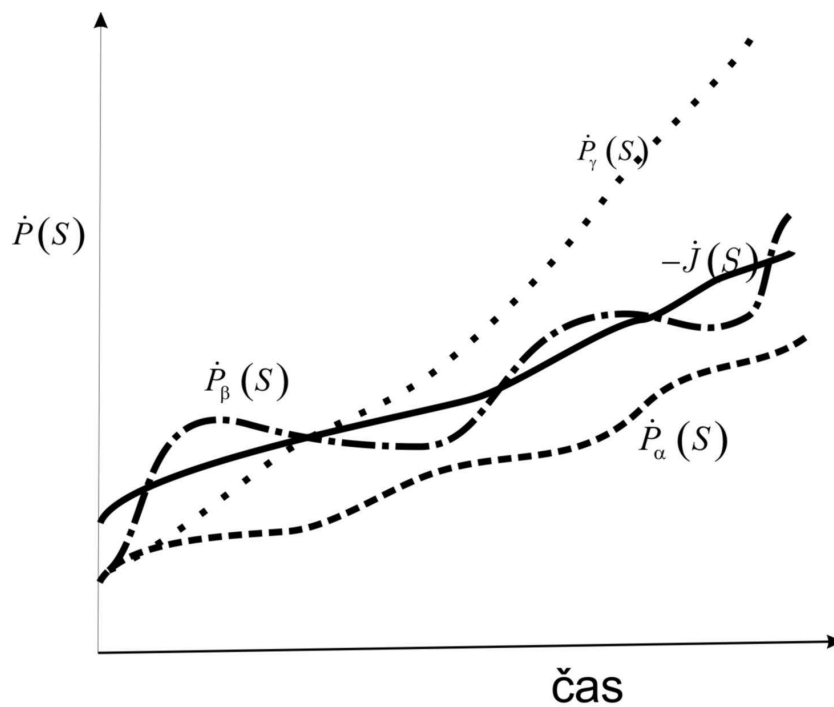
$$\dot{\overline{\Delta Q}} (= -100 \text{ W}) = -\dot{\overline{\Delta G}} (15 \text{ mg/s glukózy}) \quad \text{bazální metabolismus } 8640 \text{ kJ/den.} \quad (6.7)$$

Za těchto podmínek určuje tepelný výkon (100 W) množství spotřebovávané glukózy¹. Použitím rovnice bilance energie (6.7) dostáváme z podmínky dynamické rovnováhy (6.6) odhad produkce entropie pro člověka v bazálním metabolismu při pokojové teplotě 18°C

$$\begin{aligned} P(S) &= -\frac{\dot{\overline{\Delta Q}}}{273 + 18} - \frac{\dot{\overline{\Delta Q}}}{273 + 37} \\ &= -(-100) \cdot \left(\frac{1}{273 + 18} + \frac{1}{273 + 37} \right) = 0.666 \text{ WK}^{-1} > 0. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že uchování této minimální produkce entropie, která je nutná k udržení termodynamické nerovnováhy (obrazně řečeno “zachování života”), závisí silně na teplotě okolí. K jejímu porušení může dojít i při špatném odvodu tepla, protože ve vztahu (6.8) musí být $\dot{\overline{\Delta Q}} < 0$, což odpovídá odvodu tepla. Všichni nakonec víme, jak se v horku špatně pracuje (při duševní práci je odvod tepla větší přibližně $\dot{\overline{\Delta Q}} < -150 \text{ W}$).

¹Hodnota bazálního metabolismu 8640 kJ/den bývá používána jako limitní hodnota přijímané potravy pro dosti “drastické” diety. Cílem je vyprovokovat tělo k likvidaci zásob (tuků). Důsledné dodržování této hodnoty, může vést až k anorexii, při níž organismus ztrácí schopnost zpracovávat potravu, viz vývoj P_γ na Obr. 6.1. Podrobněji viz např. na <http://www.bazalnimetabolismus.cz/>.



Obr. 6.1. Znázornění vývoje otevřených systémů v závislosti na jejich interakci s okolím. \dot{P}_α – stabilní vývoj, \dot{P}_β – dynamický vývoj, \dot{P}_γ – nestabilní vývoj.

Budeme nyní analyzovat podmínku stabilního vývoje (6.5). V zásadě můžeme vývoj otevřeného systému rozdělit na tři typy, viz Obr. 6.1.:

α) Trvalý udržitelný rozvoj je zajištěn podmínkou $-\overline{\dot{\mathcal{J}}(S)} > \overline{\dot{P}(S)}$, tj. růst produkce entropie je vždy menší než nárůst interakce systému s prostředím. Velikost interakce s prostředím (příjem potravy a produkce odpadů) je reprezentována záporným tokem entropie.

β) Dynamický vývoj je charakterizován střídáním stabilních a nestabilních period (periodický výskyt krizí).

γ) Nestabilní vývoj vedoucí k zániku systému. Je charakterizován trvalým nárůstem produkce entropie, který není kompenzován záporným tokem entropie. Tuto situaci můžeme s ohledem na zákon bilance entropie (6.5) formulovat takto

$$0 < (\overline{\dot{\mathcal{J}}(S)} + \overline{\dot{P}(S)})dt = \frac{d\dot{S}}{dt}dt, \quad \Rightarrow \quad d\dot{S} > 0, \quad \Rightarrow \quad \int_{t_0}^t d\dot{S} = \dot{S}(t) - \dot{S}(t_0) > 0. \quad (6.9)$$

Entropie celého systému bude časem narůstat a systém bude směřovat ke stavu termodynamické rovnováhy, která se z biologického hlediska rovná smrti. Porovnej

se vztahem (6.6), kde se absolutní hodnota členu $\overline{\Delta G}$ bude zmenšovat rychleji než odvod tepla. I když bude stále platit zákon zachování energie (6.7), dojde díky konečným relaxačním časům k nevratnému nárůstu entropie.

Závěr

Důsledky termodynamických podmínek stability jsou snadno ověřitelné každodenní zkušeností. S neživou přírodou, především se stavbou energetických strojů a s chemií, je termodynamika spojována od samého počátku, tj. od konce 19. století. Její využití v biologii začíná až v druhé polovině 20. století, viz Tab. 1. Vzhledem k široké třídě systémů, na které jsou její zákonitosti použitelné, lze očekávat, že bude stále častěji využívána nejen v biologii, ale i v ekologii a pravděpodobně i v ekonomii. Empiricky je prokázáno, že ekonomicky rostoucí systém (alespoň 1% a více) je stabilní [11]. Stabilita se většinou promítá i do politické situace.

Uvážíme-li, že jednou ze základních vlastností živých systémů je snaha udržet se při životě tj. existovat, je důsledkem této snahy následný *boj o prostor a zdroje*. Výsledkem je pak soupeření na úrovni ekologických a politických systémů a ukazuje se, že znalost vhodných způsobů (v závislosti na okolí a vnitřní struktuře) transformace energií a látek je jistou evoluční výhodou. Moderní evoluční biologie dokazuje, že hnací silou evoluce je vnitrodruhový boj, a to nejen na úrovni jedinců, ale i na úrovni mnohem menších jednotek jako jsou geny, bakterie, viry apod [4]. Tento “boj” je důsledek nějakého mnohem obecnějšího principu, např. minima Gibbsovy volné entalpie (pro chemické reakce), celkové entalpie (pro termomechanické systémy), popř. produkce entropie a s ní spojenou stabilitou v daných podmínkách (pro obecné otevřené systémy).

V článku uvedené úvahy o využití termodynamiky otevřených systémů se nedotýkají jedné ze základních vlastností fluktuací podsystémů, a to jejich *korelací*. Všechny používané makroskopické veličiny jsou důsledkem jakéhosi “ustřednění” velkého množství vzájemného působení jednotlivých podsystémů (kontaktních srážek, silového

působení apod), takže došlo ke “smazání” korelací mezi jednotlivými akty. U systémů, které jsou na hranici stability, hrají korelace dominantní roli. Např. bublinka ve vodě při pokojové teplotě spontánně vznikne, ale záhy zaniká, avšak těsně před bodem varu anebo u přehřáté vody se rozvine a vede systém (vodu) ke změně skupenství, tedy k nestabilitě. U ekologických systémů mluvíme o revoluci. Otázkou zůstává, jaké vlastnosti bude mít systém za nestabilitou, kde již platí jiné konstitutivní vztahy. I když se podsystémy nezměnily (atomy, molekuly, jedinci apod.), vztahy mezi nimi se změnily. Studium kinetiky těchto změn a vlastností nových stavů je výzvou pro další rozvoj *nerovnovážné termodynamiky*.

Literatura

- [1] Boltzmann L.: *Theoretical physics and philosophical problem*. S. G. Brush (Trans.). Boston: Reidel, 1974. (Original work published 1886)
- [2] Clausius, R. : *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheoriein*. Annalen der Physik und Chemie 93 (12), (1854): 481-506.
- [3] Chandrasekhar, S.: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. Oxford: Clarendon, 1961.
- [4] Dawkins R.: *Sobecký gen*. Mladá fronta (edice Kolumbus), Praha 1998
- [5] Eddington A.S.: *The Nature of the Physical World*. New York: The Maxmillan Company, 1929.
- [6] Eigen M.: *Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules*. Naturwiss., 58 (1971):465-523
- [7] Einstein A.: *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems*. Phys. Zeitschr. 10 (1909): 185-193.
- [8] Gibbs, J.W.: *On the Fundamental Formula of Statistical Mechanics, with Applications to Astronomy and Thermodynamics*. Proceedings of the American Association for the Advancement of Science, 33, 57-58 (1884). Reproduced in The

- Scientific Papers of J. Willard Gibbs, Vol II (1906): pp. 16.
- [9] de Groot, S., R. and Mazur, P.: *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Amsterdam: North-Holland, 1962.
- [10] Glansdorff, P., Prigogine, I.: *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*. New York: Wiley - Interscience, 1971.
- [11] Jorgensen, S., E. and Svirezhev Y.,M.: *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Elsevier Ltd.,2004, <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080441665>
- [12] Jou, D., Casas-Vázquez, J., Lebon, G.: *Extended Irreversible Thermodynamics*. 4th edition, Berlin: Springer, 2010.
- [13] Kvasnica J.: *Termodynamika*. SNTL, Praha, 1965
- [14] Landau, L., D.,Lifshitz, E., M.: *Statistical Physics*. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- [15] Landau, L., D., Lifshitz, E., M.: *Fluid Mechanics*. Oxford: Pergamon Press, 1987.
- [16] Maršík F., Dvořák I.: *Biotermodynamika*. Academia Praha, 1998
- [17] Maršík, F.: *Termodynamika kontinua*. Praha: Academia, 1999.
- [18] Maršík, F.: *Šíření vln a nelineární jevy v disipativních systémech*. Vysoká škola báňská, Technická Universita Ostrava, 2015
- [19] Onsager L.: *Reciprocal relations in irreversible processes I. II*. Phys. Rev. 37:405-426, 38 (1931); 2265-2279
- [20] Prigogine, I.: *From Being to Becoming*. W.H.Freeman and Company, San Francisco, 1980
- [21] Rosenberg J: *Něco o entropii*. Bulletin ČSM, č. 1, (2015), ISSN 1211-2046.
- [22] Schrödinger E.: *What is life*. Based on lectures delivered under the auspices of the Dublin Institute for Advanced Studies at Trinity College, Dublin, in February 1943. [http : //whatislife.stanford.edu/LoCoFiles/What – is – Life.pdf](http://whatislife.stanford.edu/LoCoFiles/What-is-Life.pdf)
- [23] Voet D., Voet Judith G.: *Biochemistry*. Second edition, John Wiley N.Y.,1995

Kronika

Chronicle

90 let Hon. Prof., Dr. Ing. Aleše Tondla DrSc., Dr.h.c.

Jeden z našich nejvýznamnějších vědeckých pracovníků z poválečného období v oblasti strojní mechaniky Aleš Tondl se v letošním roce dožívá devadesáti let. Narodil se 31. července ve Znojmě v rodině učitele a po dokončení reálného gymnázia pokračoval na Strojní fakultě VUT v Brně. Brzy po absolvování VUT předložil doktorskou dizertační práci a byl promován doktorem technických věd (Dr.). Na podzim 1950 nastoupil vědeckou aspiranturu na ČVUT Praha u prof. Budinského, kde se zaměřil na teoretický a experimentální výzkum dynamiky rotorů a na analýzu parametrických kmitů a získal titul kandidát technických věd (CSc.).

Se stejným zaměřením působil od roku 1953 do 1990 ve Státním výzkumném ústavu pro stavbu strojů v Praze – Běchovicích, kde se velmi intenzivně zabýval problémy dynamiky strojů, zejména stabilitou jejich pohybu a vznikem samobuzených kmitů vlivem uložení rotoru v kluzných ložiskách. Kromě vyřešení řady závažných úloh pro praxi shrnul výsledky svých obsáhlých teoretických i experimentálních prací do knihy *Some Problems of Rotor Dynamics* (vyšla v angličtině, ruštině a japonštině), která měla veliký ohlas v celém světě a umožnila mu i přes tehdejší obtížné podmínky navázat plodnou spolupráci s mnoha významnými vědci v zahraničí.

Za přínos pro rozvoj vědy v dynamice rotorů a za vyřešení mnoha závažných problémů pro československý průmysl byla Aleši Tondlovi v roce 1963 udělena státní cena.

V roce 1964 se habilitoval pro obor technické mechaniky na Strojní fakultě ČVUT v Praze, kde také v roce 1967 obhájil dizertační práci a získal vědecký titul doktor technických věd (DrSc.). Své dílčí výsledky publikoval v našich i zahraničních časopisech a také formou referátů na vědeckých konferencích u nás i v zahraničí. Aleš Tondl byl nejen přispěvatelem, ale též členem redakční rady Strojnického časopisu a Journal of Sound and Vibration a členem širší redakční rady časopisu Nonlinear Dynamics. Význačná je také jeho mimokonferenční přednášková činnost, neboť na individuální pozvání přednesl celou řadu přednášek na zahraničních univerzitách (Anglie, SRN, NDR, Holandsko, Rakousko, Itálie aj.).

Ve svém vědeckém zaměření se neomezoval pouze na tematiku dynamiky strojů, ale jeho činnost byla velmi široká a zahrnovala i další oblasti základního výzkumu, např. nelineární vlastní i vynucené kmitání mechanických soustav, samobuzené kmitání, tlumení různých typů kmitání včetně technických problémů jako je kmitání kabiny lanovky, kývání lodí, kmitání tkacích vřeten apod.

Při výzkumu zákonitostí parametrického kmitání odhalil nový zajímavý jev, spočívající v tom, že v určitém intervalu frekvence parametrického buzení dochází k úplnému potlačení samobuzených kmitů, tj. v určitém intervalu frekvence parametrického buzení je zvýšena hladina pozitivního tlumení. Tento jev byl nazván parametrická antirezonance a lze jej využít k potlačení nejen samobuzených ale i dalších typů kmitání.

Ze zdravotních důvodů odešel Aleš Tondl koncem roku 1990 do penze, ale svoji vědeckou aktivitu nijak neutlumil. I v důchodu pokračoval ve výzkumné práci a ve spolupráci se zahraničními kolegy, např. s prof. R. Nabergojem z univerzity

v Terstu a s prof. F. Verhulstem z univerzity v Utrechtu. S nimi publikoval několik prací věnovaných analýze různých typů nelineárních auto-parametrických systémů.

V roce 1993 byl pozván na Technickou univerzitu ve Vídni, kde jako hostující profesor přednášel o nelineárních kmitech a speciálních problémech rotorových systémů. Následovala rozsáhlá spolupráce a několik společných publikací s prof. H. Springrem a s prof. H. Eckerem. Spolupráce s TU Wien byla oceněna v roce 1999 jmenováním doživotním honorárním profesorem a v roce 2005 čestnou medailí TU Wien.

Jeho vědecká činnost byla rovněž oceněna udělením čestného členství v Mezinárodní federaci pro teorii strojů a mechanismů (IFTToMM, Milán – 1995).

Rozsáhlá je jeho spolupráce i s českými kolegy, v devadesátých letech především s prof. C. Kratochvílem z VUT Brno, se kterým publikoval několik článků zaměřených na možnosti tlumení kmitů v nelineárních systémech. V roce 1999 u příležitosti stého výročí založení VUT Brno byl dr. Tondlovi udělen čestný doktorát.

Další spolupráce se rozvíjela s Dr. F. Peterkou (ÚT AVČR), a to se zaměřením na silně nelineární systémy s rázy. V posledních pěti letech velmi aktivně spolupracoval s Ústavem termomechaniky AV ČR (Dr. L. Pešek, Dr. L. Půst, Dr. P. Šulc) na problematice využití vlastností parametrické antirezonance k utlumení různých typů nebezpečných kmitů – rezonančních, subharmonických, kombinačních atd. Výsledkem bylo nejen několik publikací v našich a zahraničních časopisech, ale i velmi podnětné diskuze a náměty na zaměření dalších prací. S tím je spojena i přednášková aktivita prof. Tondla, který se zúčastňuje velmi často také vědeckotechnických setkání, např. kolokvia Dynamiky strojů v Praze, konference Inženýrská mechanika ve Svatce a řady dalších, a to nejen jako přednášející, ale také jako aktivní účastník diskuzí.

Aleš Tondl je autorem nebo spoluautorem 11 knih a 20 monografií menšího rozsahu (např. Rozpravy ČSAV) a více než 280 článků v našich časopisech a sbornících z konferencí.

Jako ocenění za jeho celoživotní přínos k rozvoji mechaniky, inženýrských věd a za aktivní podporu činnosti Společnosti byl mu hlavním výborem ČSM v roce 2009 udělen titul *Čestný člen České společnosti pro mechaniku*.

V roce 2012 byla prof. A. Tondlovi udělena cena prof. Z. P. Bažanta pro inženýrskou mechaniku za jeho dlouhodobý přínos k teorii nelineární mechaniky a zvláště za poslední výsledky v oboru autoparametrických systémů.

Prof. A. Tondl je celoživotně vysoce aktivní vědecký pracovník s širokým rozhledem a s velkými jazykovými i kulturními znalostmi. To mu ovšem umožnilo klidné rodinné prostředí s manželkou, synem a dvěma vnučkami. Bohužel ztráta manželky, která minulý rok zemřela, se ho citelně dotkla a jeho zdravotní stav se silně zhoršuje.

Rád bych jménem svým i jménem celé České společnosti pro mechaniku upřímně popřál Alešovi Tondlovi především rychlé uzdravení, aby i nadále a ještě dlouho se zúčastňoval vědeckých i jiných diskuzí s přáteli.

Ladislav Půst

*

Prof. Ing. Stanislav Holý osmdesátníkem

Čas nám starším kvapí neuvěřitelným tempem. Již je tomu pět let, kdy v tomto Bulletinu vyšel obsáhlý článek připomínající životní jubileum pana profesora Stanislava Holého. A 11. srpna letošního roku se prof. Holý dožívá osmdesáti let. Obdivuhodné je to zejména proto, že prof. Holý je stále aktivním akademickým pracovníkem, vědcem a pedagogem na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní ČVUT v Praze, byť jen na malý úvazek. Připomeňme si alespoň krátce životní pouť profesora Holého.

Po úspěšném absolvování gymnázia nastoupil ke studiu na Fakultu strojního inženýrství ČVUT v Praze. Během studia se seznámil s prof. Šolínem, který ho spolu s dalšími směřoval na problematiku pevnosti, životnosti a spolehlivosti a nabídl mu místo pedagogického asistenta na katedře pružnosti a pevnosti tehdejší Fakulty strojního inženýrství, kde se dále profiloval. Když v r. 1961 nedostal povolení k zahájení kandidátské přípravy, přihlásil se Ing. Holý ke studiu na Fakultě elektrotechnického inženýrství, kterou, s ohledem na možnosti uznání předmětů a známek z FSI, absolvoval ve zkráceném studiu v r. 1963. V letech 1965-67 působil na částečný úvazek jako vývojový pracovník v podniku ARITMA – Analogová technika Praha a v r. 1967 přijal nabídku tehdy vzniklého Ústavu jaderných elektráren v rámci koncernu SIGMA, kde nastoupil jako vedoucí skupiny výpočtů primárního okruhu JE A1. Posléze byl prof. Hájkem vyzván k návratu na Fakultu strojní. Zkušenosti z praxe mu dovolily během krátké doby sepsat kandidátskou dizertační práci, kterou obhájil v r. 1972 a následně podat habilitační práci, kterou pak obhájil v r. 1979. Roku 1991 byl vyzván prof. Jaroslavem Valentou k předložení žádosti o zahájení profesorského řízení, po jehož úspěšném

proběhnutí byl v r. 1997 jmenován profesorem ČVUT pro obor mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí.

Jeho pedagogická činnost byla spojena zejména s přednášením v předmětech zaměřených na pružnost a pevnost, experimentální metody analýzy deformací a napětí, mezní stavy kovových a kompozitových konstrukcí i předměty v oboru biomechaniky. Kromě mateřského pracoviště působil prof. Holý i na dalších školách či fakultách doma (Fakulta elektrotechnická ČVUT 1992, VŠUP 1978, 1995-96) i v zahraničí (jako Visiting Professor na švédské univerzitě v Kristianstadu, na Letních školách pořádaných univerzitou v Bologni, krátkodobě přednášel na VŠ v Drážďanech, Magdeburku, Mainzu, Chemnitz, Londýně, Nottinghamu, Košicích, Bratislavě, Bukurešti, Vídni, Malmö, Toulouse a Bologni.). Profesor Holý vychoval celou řadu doktorandů jednak v oborech Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí a v oboru Biomechanika na FS ČVUT (19 úspěšných absolventů, z toho 4 ve spolupráci se zahraničními VŠ), jednak na dalších VŠ či fakultách technického zaměření (ČZU, TUL, FJFI).

Zkušenosti prof. Holého využívala a stále ještě využívá celá řada podniků v rámci konzultací či členství v poradních orgánech. Výsledky jeho odborných a pedagogických aktivit jsou shrnuty ve 155 výzkumných a technických zprávách, 121 člancích v odborných periodikách a konferenčních sbornících, ve 155 přednáškách na domácích a zahraničních konferencích, v 16 titulech skript a jednou účastí na monografii. Z řady ocenění domácích i zahraničních je třeba zmínit alespoň udělení Award of Merit evropské asociace EURASEM v r. 2007.

Prof. Stanislav Holý bezesporu patří a sám sebe řadil do skupiny „koní tažných“. V tomto byl náročný i na své spolupracovníky a studenty, když vyznával přístup „planě nediskutovat a dělat“. Jeho aktivity dosažením úctyhodného věku

jistě nekončí, a proto mu přejeme do dalších let hlavně pevné zdraví, životní pohodu a radost z vykonané práce.

Milan Růžička

*

K jubileu prof. Ing. Josefa Rosenberga, DrSc.

Zdá se to jako včera, kdy jsme si v této rubrice Bulletinu přečetli medailon k sedmdesátinám profesora katedry mechaniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity, Josefa Rosenberga, jenž letos v červnu oslavil již 75. narozeniny – a stejně jako před pěti lety v plné svěžesti, pracovním nasazením a se střízlivě optimistickým viděním světa.

S profesorem Rosenbergem jsem se poprvé setkal při své imatrikulaci na Fakultě strojní tehdejší Vysoké školy strojní a elektrotechnické v Plzni (VŠSE), jíž byl tehdy děkanem. O čtyři roky později, po transformacích počátku let devadesátých, které znamenaly nejen vznik Západočeské univerzity v Plzni, ale i odvážné přearování katedry mechaniky do nově založené Fakulty aplikovaných věd, jsem k němu nastoupil jako diplomant. Stal se pak školitelem mé dizertační práce, jejíž zadání však bylo zcela odlišné. To svým způsobem dokresluje velmi významný rys vědecké osobnosti profesora Rosenberga, totiž poměrně velký záběr

a především odhodlanost k pronikání do nových oblastí mechaniky. Tomu v Plzni vděčíme za rozšíření původně strojařského zaměření mechaniky jak o předměty teoretičtější, jako jsou teoretická mechanika, mechanika kontinua, tak o nestrojařské aplikace v podobě zavedení studia biomechaniky. Nejprve ale dovoluť alespoň stručný výňatek z jeho curricula.

Prof. Rosenberg je celoživotně spjat s Plzní. Rodinné zázemí jej předurčilo pro studium na Strojní fakultě VŠSE, kde absolvoval v oboru obráběcích strojů a obrábění. Jeho další směřování zcela zásadně ovlivnil prof. Dr. Ing. Miroslav Šejvl, DrSc., tehdejší vedoucí katedry mechaniky, znalec rychlých motocyklů BMW, ale především uznávaná kapacita v technické mechanice zabývající se teorií ozubených převodů. Pod jeho vedením se tehdejší aspirant Ing. Rosenberg vypracoval na odborníka v oblasti hypoidních převodů (připomeňme jeho stáže u firem Oerlikon v Zurichu a WZL Aachen). Spolu s profesorem Šejvlem velmi významně posunuli vývoj teorie ozubených kol a spoluprací se Škodou Mladá Boleslav, Tatrou v Kopřivnici a s ÚVMV Praha přispěli „našemu znárodněnému“ automobilovému průmyslu.

Prof. Rosenberg prošel na katedře mechaniky VŠSE všemi stupni akademicko-vědeckých postů, od odborného asistenta (kandidátskou práci obhájil v r. 1967), přes docenta (habilitační práci obhájil v r. 1975) až po „velký doktorát“ a následné jmenování profesorem pro obor Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí (v r. 1987). Kromě odborné činnosti a pedagogického působení se prof. Rosenberg podílel i na rozvoji bývalé VŠSE a nynější Západočeské univerzity (ZČU), a to postupně ve funkcích vedoucího katedry mechaniky, děkana Strojní fakulty VŠSE, posléze proděkana Fakulty aplikovaných věd (FAV) ZČU a konečně ve funkci prorektora ZČU pro rozvoj a strategii, kde dokonale zúročil též své výborné jazykové schopnosti a komunikativnost. V tomto období se mu podařilo

navázat odborné kontakty s partnerskými pracovišti v Marseille, Paříži, Římě, Londýně a Dortmundu, jakož i získat některé významné projekty vědy a výzkumu. Jeho manažerské schopnosti vyústily v založení nového vysokoškolského ústavu v rámci ZČU, totiž výzkumného centra Nové technologie (NTC). V pozici ředitele, kterou zastával několik let, provedl NTC nelehkým počátečním obdobím a zasloužil se tak o jeho úspěšné etablování nejen v národním měřítku. Přestože řídicí funkce předal mladší generaci, své zkušenosti poskytuje i nadále jako poradce ředitele NTC. Výčet jeho aktivit v akademické sféře a činností v odborných společnostech nelze na omezené ploše tohoto příspěvku v úplnosti podchytit; pracoval v několika vědeckých radách, mnohých zkušebních komisích a několik let předsedal české pobočce GAMM. V neposlední řadě připomeňme jeho dlouholeté předsednictví plzeňské pobočky České společnosti pro mechaniku.

Proměna katedry mechaniky od servisní katedry Strojní fakulty k do značné míry autonomní pedagogické a výzkumné jednotce Fakulty aplikovaných věd se odráží i v odborném zaměření prof. Rosenberga. Jeho vnímání mechaniky bylo vždy ovlivněno silným vztahem k matematice a právě zmíněné okolnosti vzniku nového prostředí v kontextu „vědeckěji zaměřených“ kateder FAV mu umožnily uplatnit jeho obdivuhodnou erudici ve studiu moderních partií mechaniky, což vyústilo počátkem let devadesátých v zavedení nových předmětů teoretická mechanika a nelineární dynamika a chaos. Osvíceným koncepčním krokem k modernímu pojetí výuky mechaniky bylo sestavení předmětu mechanika kontinua, který byl nabízen i pro studenty fyziky a matematického modelování. Prof. Rosenberg k tomu měl ty nejlepší předpoklady díky pevnému základu v tenzorovém počtu i předcházejícímu důkladnému studiu termodynamiky a variačních principů, které si osvojil mimo jiné prací na deformační formulaci úlohy plasticity. V tomto období spolupracoval s doktorem Miroslavem Hlaváčkem z MÚ

AV ČR a během několikaměsíčního pobytu na Brunel University se spřátelil s prof. Johnem Whitemanem, odborníkem světového formátu na metodu konečných prvků. Tuto etapu jeho vědeckého působení si dovoluji vyzdvihnout, neboť zmíněné skutečnosti vymezily nejen rámec mého doktorského studia, ale i mých budoucích odborných aktivit.

Jako osobnosti se širokým rozhledem mu nemohl uniknout nástup tehdy moderní biomechaniky, k níž má velmi blízko i díky lékařskému prostředí své rodiny. Spolu s kolegou prof. Křenem sestavili předmět biomechanika a na fakultě zavedli obor Biomechanika a lékařské inženýrství, který nejenže významně rozšířil portfolio uchazečů o studium na katedře mechaniky, ale především vytvořil předpoklady pro získání a úspěšné řešení několika grantových projektů základního výzkumu v oblasti dolní a horní části močového traktu. Prof. Rosenberg má rovněž zásluhu na zakotvení „plzeňské“ biomechaniky navázáním spolupráce se zahraničními univerzitami, např. v Marseille, Paříži a Římě, která se projevila vzájemnou výměnou studentů magisterského i doktorského studia.

Oblasti biomechaniky se aktivně věnuje s plným nasazením i nadále - mezi jeho nedávné aktivity patří úspěšné vedení projektu OPVK zakončeného vydáním obsáhlé učebnice, který posílil spoluprací FAV s Fakultní nemocnicí v Plzni. V současné době se věnuje modelování dynamiky buněčných procesů, přičemž intenzivně a úspěšně spolupracuje s fyziology a zúročuje i letité zkušenosti v oboru dynamických systémů a chaosu.

Šíře jeho vědeckého záběru vždy podpořeného nejen důkladným studiem, ale i snahou o přenesení nových poznatků do výuky jím zajišťovaných předmětů je obdivuhodná, uvědomíme-li si, kam se během své kariéry dopravoval od výzkumu hypoidních převodů. Prof. Rosenberg vedl mnoho úspěšných studentů doktorského studia (včetně několika aspirantů v dobách VŠSE), z nichž někteří se stali jeho

kolegy a spolupracovníky. Patří jistě k těm školitelům, kteří svým svěřencům nechávají dostatečný prostor k jejich vlastní tvůrčí invenci, ale zároveň v rozhodujících momentech poradí a pomohou. Jsem upřímně rád, že jsem pod jeho záštitou a celkovou morální podporou, jíž si nesmírně cením, prošel všemi etapami odborného růstu. Jeho názory a rady jsem vždy respektoval. Mnozí mí kolegové by takovou zkušenost mohli jen potvrdit.

Kromě mechaniky se prof. Rosenbergovi stala velkým koníčkem i moderní fyzika, jejíž nové trendy neustále sleduje. Okruh jeho zálib se ovšem neomezuje jen na exaktní vědy a techniku. Má silné pouto k malířství, rád tráví čas procházkami se psem, velmi rád cestuje, věnuje se lyžování a k jeho sportovním aktivitám před několika lety přibyl i golf. Tak jako mu rodina byla po celou dobu oporou a poskytla spolehlivé zázemí pro jeho vědeckou práci, je on nyní starostlivým dědečkem svých vnoučat.

Profesor Rosenberg zcela nepochybně patří k nejvýraznějším osobnostem Západočeské univerzity a díky svým odborným ale zároveň i lidským kvalitám prokázal plzeňskému vysokému školství neocenitelné služby. Za všechny spolupracovníky z katedry mechaniky a členy plzeňské pobočky České společnosti pro mechaniku si dovoluji popřát svému kolegovi a příteli prof. Rosenbergovi pevné zdraví, mnoho štěstí, osobní pohody a radosti z další vědecké práce při modelování v biomechanice.

Eduard Rohan

*

75 let prof. Ing. Stanislava Vejvody, CSc.

Ve skvělé duševní, fyzické i pracovní kondici se prof. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc. dožívá letos v červnu významného jubilea 75 let. Prof. Stanislav Vejvoda se narodil 30. 6. 1940 v Zadražanech v okrese Hradec Králové v rodině rolníka jako první ze čtyř dětí. Po ukončení Jedenáctileté střední školy v Novém Bydžově maturitou v roce 1957 odešel studovat do Brna na Ženíjní fakultu Vojenské akademie AZ, specializaci ženíjní, stavební a zemní stroje a mechanizace stavebních prací. Studium ukončil v roce 1962 obhajobou diplomové práce a státní závěrečnou zkouškou s prospěchem výborným a získal titul inženýr.

Do zaměstnání nastoupil počátkem září 1962 do Konstrukce a projekce velkostrojů společnosti VÍTKOVICE v Bílině jako statik. Od 1. července 1964 až do 31. srpna 2010 pracoval v Ústavu aplikované mechaniky v Brně, nejprve jako výzkumný pracovník a po obhájení kandidátské dizertační práce v roce 1974 jako vědecký pracovník. Vedení ústavu převzal od 1. 1. 1992 po dvou vysoce odborně erudovaných odbornících prof. Ing. Vlastimilu Křupkovi, DrSc. a prof. Ing. Jiřím Novotném, DrSc. (byl ve vedoucí funkci po dobu 3 let, kdy prof. Křupka přednášel v Egyptě). Jeho snahou bylo pokračovat v zaměření ústavu a dále ho rozvíjet. Velice si tudíž cení toho, že jej prof. Křupka zavčas usměrnil a zabránil tak např. přeceňování jaderné energetiky, kterou tehdy prof. Vejvoda v ústavu vedl. Uvědomil si, že zaměřením ústavu jsou kromě jaderné energetiky také velkstroje, hutní nádoby, uskladňovací nádrže, tlakové nádoby pro energetiku, chemický a petrochemický průmysl, experimentální měření, stožáry, jeřáby, válcovací stolice a zařízení pro dopravu a experimentální měření.

Po transformaci ústavu na Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o. v červenci 1994 se prof. Vejvoda stal jednatelem ve funkci ředitele tohoto ústavu, a to až do

konce dubna v roce 2009. Ústav řídil téměř 18 roků. Od 1. září 2010 pracuje ve společnosti VÍTKOVICE ÚAM, a.s., přičemž do 31.3.2013 byl jejím ředitelem.

Odborné myšlení prof. Vejvody významně ovlivnili prof. Vlastimil Křupka a prof. Jaroslav Němec a filozofické názory Vítězslav Gardavský. Za své největší ocenění považuje veřejný výrok prof. Němce: „Pane kolego, nežil jste nadarmo“. Obraz namalovaný a darovaný prof. Němcem má doma ve své pracovně. S prof. Němcem úzce spolupracoval zejména při řešení problémů při výstavbě JE Temelín. K rozvoji jeho odborné činnosti také přispěli prof. Klesnil, prof. Lukáš, prof. Mazanec, doc. Kálna, Ing. Linhart a další osobnosti z oblasti únavy a lomové mechaniky ocelových konstrukcí.

Prof. Vejvoda využíval svých znalostí při řešení problémů v oblasti klasické energetiky, velkostrojů, uskladňovacích nádrží v chemickém a petrochemickém průmyslu, což vyžadovalo rozvoj metodik výpočtů a experimentálních metod. Inicioval a aktivně se podílel na rozvoji diagnostických systémů. V době, kdy vedl Ústav aplikované mechaniky Brno, rozvíjel diagnostický systém DIALIFE, který je provozován v klasických elektrárnách ČEZ. Ve společnosti VÍTKOVICE ÚAM, a.s. rozvíjí monitorovací a diagnostický systém MDSsystem, v němž zpřesnil matematické popisy procesů poškozování materiálu membránových stěn, potrubí, komor, bubnů a parovodů creepem, únavou, tvorbou a odprýskáváním oxidických vrstev. Pro posuzování mezních stavů pevnosti rozvíjel systém STATES, který byl aktivován a prodáván za jeho působení ve VÚ VÍTKOVICE. Nyní odborně podporuje rozvoj rozsáhlejšího systému STRENGTH.

Na základě zkušeností s tvorbou norem pro JE sdružil po roce 1990 odborníky z oblasti JE a po dohodě s SÚJB a ITI Praha začali pod záštitou Asociace strojních inženýrů České republiky vytvářet Normativně technickou dokumentaci Asociace strojních inženýrů (NTD ASI) pro zařízení jaderných elektráren typu VVER. ČR je

tak jednou ze tří zemí EU, která má standardy pro JE. Standard je znám v Evropě i ve společnosti ASME. Prof. Hasegava z Japonska zahrnul do porovnávání postupů dle jednotlivých standardů pro JE také NTD ASI. Díky činnosti při řízení tvorby NTD ASI byl prof. Vejvoda přijat za člena dnes již nečinné organizace Working Group on Codes and Standards and Activity Groups of the WGCS, European Commission, Directorate General XI, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. Tvorbu NTD ASI řídil do konce roku 2012. Nakonec své členství v ASI koncem roku 2013 ukončil. Svým následovatelům tedy zanechal několik „dobrých hraček“.

Vědecké hodnosti CSc. dosáhl prof. Vejvoda v roce 1974, pedagogické hodnosti docenta v roce 1992 na VAAZ Brno a profesorem se stal v roce 1995 na VUT v Brně. Po dobu šesti a půl měsíce absolvoval prostřednictvím IAEA ve Vídni studijní pobyt ve Failure Associates Analyses, Department of Fracture Mechanics, Palo Alto, California, USA. Díky účasti na mezinárodních konferencích poznal všechny osídlené světadíly. Nejčastěji, 55 krát byl v Rusku, 5 krát v USA (8 měsíců), 7 krát v JAR. Před rokem 1989 usiloval o úzkou spolupráci ÚAM Brno s FAA v Kalifornii, což se málem podařilo. Velvyslanec ČSSR v USA v této věci FAA navštívil, ale problémem byl v tom, že FAA mělo zájem ÚAM Brno koupit, aby mělo pobočku v Evropě, což tehdy nebylo možné. Trvale však udržuje kontakt s jedním ze zakladatelů FAA panem Dr. Bernardem Rossem.

Aktivita prof. Vejvody v pedagogické oblasti započala v roce 1977. Do roku 2008 přednášel a garantoval čtyři předměty na Ústavu procesního a ekologického inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Přednášel též na VŠB TU Ostrava, po několik let učil v kurzech pro inženýry a technology svařování na VUT v Brně a doposud na ČSÚ při VŠB TU Ostrava. Podílel se na organizaci a výuce v kurzech pro výpočtáře a konstruktéry tlakových nádob na VUT v Brně. Byl

členem vědecké rady FAST VUT v Brně a FS Univerzity obrany. V současné době je po druhé období členem vědecké rady VŠB TU Ostrava. Po jedno období byl externím členem senátu AV ČR. Je členem oborové rady 36-34-9 Konstrukce a dopravní stavby doktorského studijního programu na Fakultě stavební VUT v Brně, dříve vedené prof. Melcherem a nyní prof. Karmazínovou, se kterými úzce spolupracuje v oblasti experimentálních zkoušek ve sdružené laboratoři Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí. Na FAST VUT v Brně je také členem komise pro obhajoby dizertačních prací doktorandů. Na FSI VUT v Brně doposud vede doktorandy.

Prof. Vejvoda je členem International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology. Pro období 1999 až 2007 byl jmenován do Board of Directors, přičemž v letech 1999 až 2001 zastával funkce viceprezidenta a tajemníka. Prezidentem byl mezi lety 2001 až 2003. Nyní jako bývalý prezident je členem Advisory Board.

Prof. Vejvoda je dále aktivní v těchto společnostech: Společnost pro mechaniku, členem celostátního výboru 2001 až 2003; od roku 2008 členem Českého národního komitétu pro teoretickou a aplikovanou mechaniku – IUTAM; Asociace výzkumných organizací, členem předsednictva 1994 až 2003. Patří mezi zakládající členy Asociace strojních inženýrů, ve které k 31. 12. 2013 ukončil členství. Byl členem The American Society of Mechanical Engineers (ASME) a členem Lions Club Brno Špilberk. Čtyři roky do roku 2008 byl členem Editorial Board časopisu Journal of Process Mechanical Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, UK.

Při příležitosti oslavy 115 výročí založení VUT v Brně obdržel Pamětní medaili VUT v Brně.

Během své výzkumné a vědecké činnosti uveřejnil 15 článků v českých a slovenských časopisech, 2 v zahraničních časopisech (Problemy pročnosti a Journal of Nuclear Engineering and Design) a 2 příspěvky v zahraničních knižních publikacích. Ve sbornících z tuzemských konferencí publikoval 112 příspěvků a z mezinárodních konferencí 52. Příspěvky přednáší v angličtině a v ruštině.

Je řešitelem projektů MPO, TAČR, ve kterých spolupracuje s FAST VUT v Brně, VŠB TU Ostrava a VŠCHT v Praze. Přitom si velice cení spolupráce s prof. Štěpánkem, prof. Strnadelem, prof. Melcherem, prof. Karmazínovou a doc. Bystrianským. Výstupy z posledních projektů, které uplatňuje při rozvoji MDSystemu připravuje k publikaci v zahraničních časopisech.

Přestože prof. Vejvoda už padesát pět let chodí na pravidelné kontroly jater, stále aktivně pracuje. Od operace štítné žlázy v roce 1968 doposud však neměl ani jeden den nemocenskou při minimální aplikaci léků. Asi před 6 lety ho začala probouzet bolest v kolenech. Ošetřující lékař mu doporučil jízdu na kole nebo plavání. Poté, co s manželkou začali pravidelně jezdit na kole 17 km do místní hospody v Rebešovicích, potíže zmizely. Soboty a neděle pracuje na zahradě, mnohokrát prošel Šumavu, Beskydy a částečně Krkonoše, poslední léta alespoň jeden týden v roce tráví s manželkou v Pišťanech.

Prof. Vejvoda je mezi spolupracovníky a kolegy oblíben pro vstřícnou, vlídnou a nekonfliktní povahu. Je uznávaným a významným odborníkem ve svém oboru u nás i v zahraničí. Výčet vědecké, výzkumné a pedagogické činnosti i další aktivity prof. Vejvody dokládají jeho mimořádný přínos pro rozvoj vědy, technologie, inovačních procesů, technického vzdělávání i mezinárodní spolupráce. Ten je založený jak na jeho vysoké kvalifikaci a nezměrném pracovním úsilí, tak i na vstřícném, seriózním, klidném, uvážlivém i náročném a otevřeném přístupu ke svým kolegům, spolupracovníkům, přátelům a studentům. Za všechny kolegy si

dovolují poděkovat prof. Stanislavu Vejvodovi za jeho práci a popřát do dalších let pevné zdraví, mnoho dalších odborných a vědeckých úspěchů i spokojenost a radost v kruhu rodiny, přátel a spolupracovníků.

Jindřich Melcher

*

Prof. Dr. Ing. Jan Dupal šedesátníkem

Profesor mechaniky Jan Dupal v červenci oslaví kulaté šedesáté narozeniny. Narodil se 19. 7. 1955 v Plzni, které zasvětil celý svůj dosavadní život. Po základní škole nastoupil na Střední průmyslovou školu strojnickou v Plzni, kde maturoval v roce 1974. Vysokoškolský titul inženýr získal v roce 1979 na Vysoké škole strojní a elektrotechnické v Plzni (VŠSE) v oboru Technologie výroby jaderně-energetických zařízení. Poté díky svým sportovním schopnostem ve volejbale strávil povinný vojenský rok v Dukle Rakovník. Dlouholeté soutěžní zkušenosti mu později pomohly stát se nejslavnějším a rozhodujícím hráčem českého výběru na tradičních volejbalových zápasech mezi mechaniky v polské Visle.

V roce 1980 započala jeho profesní dráha ve Výzkumně-vývojové základně pro reaktory Závodu energetického strojírenství ŠKODA Plzeň, kde se ve skupině Ing. Pečínky zabýval zejména dynamikou komponent jaderných reaktorů. V roce

1984 ho zlákala práce na plzeňské katedře mechaniky a pružnosti VŠSE, kam nastoupil na pozici odborného asistenta. Tato katedra se všemi proměnami spojenými se založením Fakulty aplikovaných věd (FAV) a následně Západočeské univerzity v Plzni (ZČU) se mu stala osudovou a pracuje zde již více než třicet let.

Vzdělání si rozšířil v roce 1992, kdy obhájil dizertační práci s názvem Syntéza dynamických kmitavých soustav a získal titul Dr. (tehdejší ekvivalent CSc. a Ph.D.). Traduje se, že Jan Dupal získal tento titul na Západočeské univerzitě jako první a vlastní tedy diplom s číslem 1. Svě znalosti si prohluboval na zahraničních pobytech, z nichž nejvíce si cení opakované stáže na Manchester Metropolitan University v Anglii. V roce 2000 se habilitoval a profesorský titul v oboru mechanika obdržel v roce 2010, vše na Fakultě aplikovaných věd ZČU. Mezi své nejvýznamnější učitele řadí prof. Vladimíra Zemana a prof. Miroslava Baldu.

Odborně je během své kariéry zaměřen zejména na dynamickou analýzu a optimalizaci rotačních strojů a těleso-nosíkových soustav (např. primárních okruhů jaderných elektráren včetně kompletních modelů reaktoru), stabilitu a dynamickou odezvu parametrických systémů řešenou analytickými metodami, vibroakustiku a mechaniku stochastických systémů. Kromě prací spadajících do základního výzkumu v rámci různých projektů GA ČR a dvou výzkumných záměrů MŠMT má za sebou nespočetné množství vyřešených inženýrských problémů pro partnery z průmyslu. Jím vyvinutý software pro dynamickou analýzu rotorů je používán například ve společnostech Doosan Škoda Power a BRUSH SEM. Aktuálně je spoluřešitelem jednoho projektu GA ČR zabývajícího se návrhem vícestupňových mechanismů s aktivním řízením, je garantem bilaterálního projektu mezi ZČU a univerzitou v belgickém Mons a podílí se na řešení několika projektů TA ČR.

Z publikační činnosti prof. Dupala jmenujme skripta Výpočtové metody mechaniky, která připravil pro jím vytvořený stejnojmenný předmět a kde, kromě jiného, originálním způsobem spojuje různé numerické metody pro řešení kmitání kontinua. Dále je autorem mnoha učebních textů, odborných článků a také monografie *Mechanika stochastických systémů* z roku 2008 obsahující jeho výsledky s řadou původních pasáží ze stochastické mechaniky. Na katedře mechaniky FAV je vedoucím oddělení mechaniky a je garantem a přednášejícím několika předmětů zaměřených na dynamiku. Byl školitelem tří úspěšných doktorandů, kteří svoji odbornost uplatňují na významných pozicích v průmyslu.

V rámci České společnosti pro mechaniku zastává funkci předsedy odborné skupiny Technická mechanika. Je členem Vědecké rady FAV ZČU a členem oborových rad na FAV ZČU a Fakultě strojní ČVUT v Praze. Má rovněž zkušenosti z univerzitní samosprávy jako člen fakultního senátu.

Honza není pro své kolegy pouze ceněný odborník a pedagog, ale vyniká rovněž dalšími schopnostmi ve společenské rovině. Kromě již zmíněných sportovních úspěchů ve volejbale je významným plzeňským hráčem na pětistrunné banjo. Mnoho účastníků různých konferenčních či katedrálních večírků může potvrdit jeho bavičské schopnosti při zpěvu a hře na banjo nebo na kytaru. Dalším jeho koníčkem je včelařství, kterému se začal věnovat asi před patnácti lety a záhy se stal dvorním dodavatelem medu celé katedře.

Milý Honzo, jménem Tvých plzeňských kolegů a spolupracovníků Ti přeji vše nejlepší do dalších aktivně prožitých let, pevné zdraví a spoustu energie a radosti.

Michal Hajžman
