

## APPLICATION OF THE SIMULATION BASED RELIABILITY ANALYSIS ON THE VIBRATION OF IMPULSE TUBES

L. Pecinka<sup>1</sup>, M. Švrček<sup>1</sup>

**Summary:** *Licensing of new NPPs is every deterministic. The same is valid for design of all safety related components. Probabilistic methods represent good tool for decision making if several alternatives is proposed. In the paper is presented application of Simulation Based Reliability Analysis to experimental verification of impulse tubes reliability.*

### Deterministické řešení

Impulzní trubky jsou v běžné projektantské praxi označovány jako potrubí malých průměrů ( $D = 25,4$  mm). Jsou na jednom konci připojeny k potrubím páry, napájecí vody či čerpadlům a na druhém konci k čidlům systému kontroly a řízení, a tak předávají informace o tlaku či teplotě pracovního media. Jejich délka je značně proměnlivá a může být až 10 m. Při návrhu podpor či závěsů se vychází z normy [1], která doporučuje rozpětí pole pro vodu = 2 280 mm. Skutečná délka ovšem závisí na podmínkách při montáži a může se od doporučené hodnoty lišit. Okrajové podmínky v podporách s výjimkou vetknutí na začátku a konci jsou “něco” mezi podpora – podpora resp. vetknutí – podpora. Požadované pevnostní výpočty jsou zejména zaměřeny na ocenění tzv. gigacyklové únavy pro počet cyklů  $N = 10^{11}$ . Je to dáno tím, že okrajová podmínka vetknutí do “pracovního” potrubí či čerpadly (ventilátoru) představuje počáteční podmínku kinematického buzení. Při předpokládané délce života JE 40 a více let pak bude dosaženo počtu cyklů  $10^{11}$ . Norma [2] doporučuje dvě experimentální metody založené buď na měření vibrační rychlosti či dovoleného průhybu, což se provádí v období tzv. horkých testů. V [2] je za značně konzervativních předpokladů jako limitní rychlost vypočtena hodnota  $12,7$  mm s<sup>-1</sup> a má univerzální charakter nezávisle na typu okrajové podmínky. Pokud se týče měření dovoleného průhybu, tak ten je sice značně jednodušší, ale není univerzální. Nutno postupovat případ od případu. Tuto nevýhodu lze částečně eliminovat aplikací metody “Simulation Based Reliability Analysis” (SBRA).

### Applikace metody SBRA na měření výchylek

„Výchylková“ metoda je založena na těchto třech základních rovnicích [3]

$$\sigma_o = \frac{M_o D_o}{2I}; \quad M_o = -EJ \frac{d^2 Y}{dx^2} \Rightarrow \sigma_o = -\frac{E D_o}{2} Y'' \quad (1)$$

To znamená, že při libovolné geometrii výsledné ohybové namáhání závisí na typu okrajové podmínky a tvaru kmitu. Použijeme-li k popisu průhybu nosníkové funkce  $Y = F_m(\lambda_m x)$ , pak rovnice (1) může být přepsána do tvaru

<sup>1</sup> Ing. Ladislav Pečinka, CSc., Ing. Miroslav Švrček: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., 250 68 Husinec-Řež, čp. 130, tel.: +420.266 172 610, resp. 247, fax: +420.220 940 519, e-mail: [pel@ujv.cz](mailto:pel@ujv.cz), resp. [smi@ujv.cz](mailto:smi@ujv.cz)

$$\frac{\sigma_{o,m}}{Y_m} = \frac{E D_o}{2} \lambda_m^2 \frac{|Y_m''|_{\max}}{|Y_m|_{\max}} \quad (2)$$

V rámci dalšího zjednodušení se definuje ještě koeficient “napětí - výchylka” ve tvaru

$$S_m = \frac{E \lambda_m^2}{2} \frac{|Y_m''|_{\max}}{|Y_m|_{\max}} \left[ \frac{N}{m^4} \right] \quad (3)$$

Hodnoty  $S_m$  je nutno vypočítat pro různé typy okrajových podmínek a různé tvary kmitu, viz následující Tab. 1.

Tabulka 1: Hodnoty výchylkového napět'ového součinitele  $S_n$

Okraj. podmínka	$S_1 L^2$	$S_2 L^2$	$S_3 L^2$	$S_4 L^2$	$S_5 L^2$
vetknutý - podpora	20,352 E/2	48,352 R/2	136,45 E/2	178,25 E/2	353,8 E/2
podpora – podpora	$\pi^2 E/2$	$4 \pi^2 E/2$	$9 \pi^2 E/2$	$16 \pi^2 E/2$	$25 \pi^2 E/2$
vetknutý – vetknutý	28,175 E/2	81,73 E/2	159,9 E/2	264,3 E/2	394,81 E/2
vetknutý - volný	3,516 E/2	30,59 E/2	61,73 E/2	159,9 E/2	199,86 E/2

Rovnici (2) lze tudíž přepsat pro libovolný tvar kmitu  $\underline{m}$  do tvaru

$$\sigma_{o,m} = S_m D_o Y_m (C_2 K_2) \quad (4)$$

kde  $C_2$  a  $K_2$  jsou tzv. sekundární a špičkový napět'ový koeficient (stress indices) ASME Code Section III, Article NB 3680.

Pro výpočet dovolené výchylky  $Y_m^{dov}$  se do rovnice (4) za  $\sigma_{o,m}$  dosadí mez únavy pro počet cyklů  $N = 10^{11}$ . Vzhledem k tomu, že únavová křivka  $\sigma_{aF} - N$  je experimentálně získána pouze v rozsahu  $N \in \langle 1; 10^6 \rangle$  cyklů, pak pro její extrapolaci použijeme tzv. „ruské“ únavové školy dle které platí [4]

$$\sigma_{aF} = \frac{E}{(4n_N N_0)^m} 1,15 \ln \frac{100}{100 - Z_c} + \frac{R_m (1 + 0,014 Z_c) - \sigma_{\max}}{(4n_N N_0)^{m_e} - 1} \quad (5)$$

kde

$n_N = 10$  součinitel bezpečnosti na počet cyklů

$N_0$  počet cyklů

$R_m$  mez pevnosti

$\sigma_{\max} = R_{p0,2}$  (mez kluzu); tím se respektuje neznalost zbytkových napětí po svařování

$m = 0,5$

$m_e = 0,132 \left( \log \frac{R_m}{R_{-1}} \right) (1 + 0,014 Z_c)$

$R_{-1} = 0,4 R_m$

přičemž materiálové vlastnosti se dosazují v soulase s platnou normou a při pracovní teplotě. Po jednoduché úpravě lze rovnici (4) přepsat do bezrozměrného tvaru

$$\frac{\sigma_{aF}(N=10^{11})}{(S_m L^2)(C_2 K_2)} = \frac{Y_m^{dov} D_o}{L^2} \quad (6)$$

Spolehlivostní funkce  $R_F$  má tudíž tvar

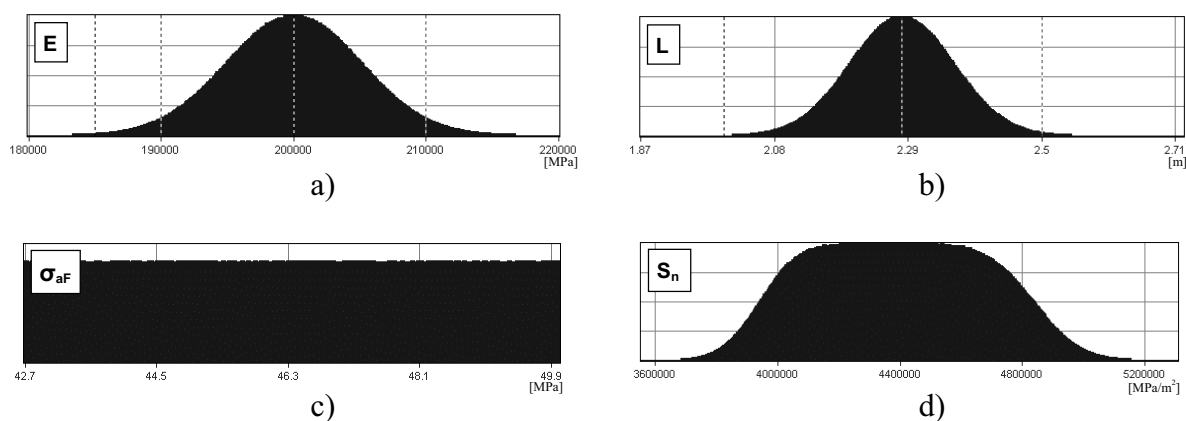
$$R_F = \frac{\sigma_{aF}(N=10^{11})}{(S_m L^2)(C_2 K_2)} - \frac{Y_m^{dov} D_o}{L^2} > 0 \quad (7)$$

a budeme hledat podmínky za kterých bude platit  $R_F < 0$ . Neurčitosti vyvolané provozem budou ve vstupních datech respektovány takto

- materiál impulzní trubky: Feritická ocel
  - provozní teplota:  $t \in \langle 20; 300 \rangle ^\circ C \Rightarrow \sigma_{aF}$  proměnné
  - okrajové podmínky proměnné od podpora – podpora k vetknutí – podpora  $\Rightarrow S_m L^2$
  - $L$  proměnné  $L \in \langle 2; 2,5 \rangle$  m
  - $D_o = 0,0254$  m
  - $C_2 K_2$  proměnné od  $C_2 K_2 = 1,8$  (tupý svar) do  $C_2 K_2 = 4,2$  (objímkový svar).

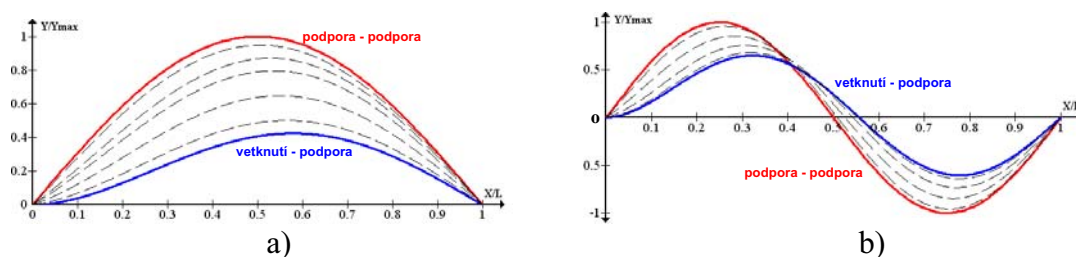
### Výsledky výpočtů

Pokud přijmeme předpoklad, že vstupní, náhodné proměnné jsou vzájemně nezávislé a časově invariantní, můžeme je pak charakterizovat omezenými histogramy. Změna provozní teploty má přímý vliv na změnu materiálových vlastností. Modul pružnosti lze pak uvažovat jako náhodně proměnnou vstupní veličinu a jeho histogram je vyobrazen na Obr. 1a. Hodnota vzdálenosti dvou sousedních podpěr, jak bylo zmíněno, je vlivem podmínek při montáži dosti variabilní. To je dáno histogramem těchto hodnot vyobrazeným na Obr. 1b, kde střední hodnotě odpovídá předepsaná velikost dle normy [1]  $L = 2,28$  m. Uvažované hodnoty napětí na mezi únavy pro  $10^{11}$  cyklů mohou vlivem nestálosti pracovní teploty a dle přijaté teorie nabývat hodnot v intervalu  $\langle 42,7 \text{ MPa}; 50 \text{ MPa} \rangle$ . Z konzervativních hledisek uvažujeme rozložení hustoty pravděpodobnosti v tomto intervalu za rovnoměrné viz Obr. 1c.



Obr. 1: Histogramy hodnot vstupních náhodně proměnných veličin

Závislost tvaru kmitu je závislá na okrajových podmínkách, ty se mohou rovnoměrně měnit mezi krajními případy „podpora–podpora“ a „vetknutí–podpora“ viz Obr. 2. Tvarová funkce je pak dána rovnoměrným rozložením mezi charakteristickými hodnotami pro zmíněné dva krajní případy (viz Tab. 1). Histogram hodnot součinitel  $S_n$  pak vlivem variability modulu pružnosti a vzájemné konvoluce nabude charakteru (pro 1. tvar kmitu) vyobrazeném na obr.1d.



Obr. 2: Vliv variability okrajové podmínky na tvary kmitání, a) první tvar kmitu, b) druhý tvar kmitu

Pro následné výpočty je dále přijat předpoklad, že v rámci jednotlivé vyšetřované oblasti impulsní trubky má její dynamická odezva na (kinematické) buzení charakter příslušný tvaru kmitu a konstantní náhodně *neměnnou* amplitudou kmitání. Hodnotu této amplitudy lze pak do výpočtu zahrnout jako konstantní hodnotu, které vždy pro zmíněné vstupní hodnoty přísluší jistý charakter spolehlivostní funkce  $RF$  dle vztahu (7). Oblast této funkce lze pak rozdělit do dvou podoblastí na jejichž základě lze vyhodnotit pravděpodobnost překročení limitního stavu, kdy napětí překračují mez pro gigacyklovou únavu  $\sigma_{aF}$ .

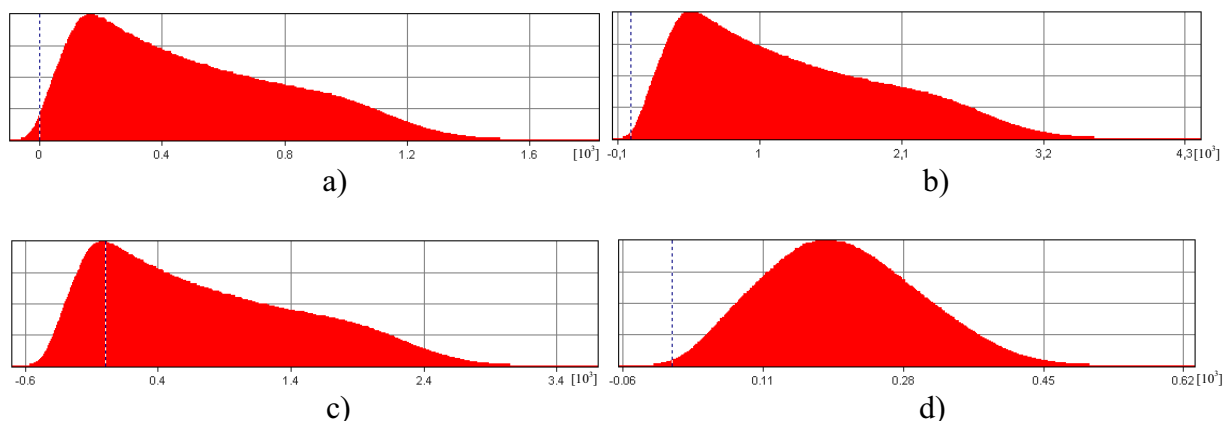
$$\begin{aligned} RF \leq 0 & \text{ odpovídá oblasti poruchy,} \\ RF > 0 & \text{ odpovídá oblasti správné funkce} \end{aligned} \quad (8)$$

Pravděpodobnost *nesprávné* funkce pak na základě výsledků jedné simulace lze vyhodnotit jako:

$$P_f = N / N_c, \quad (9)$$

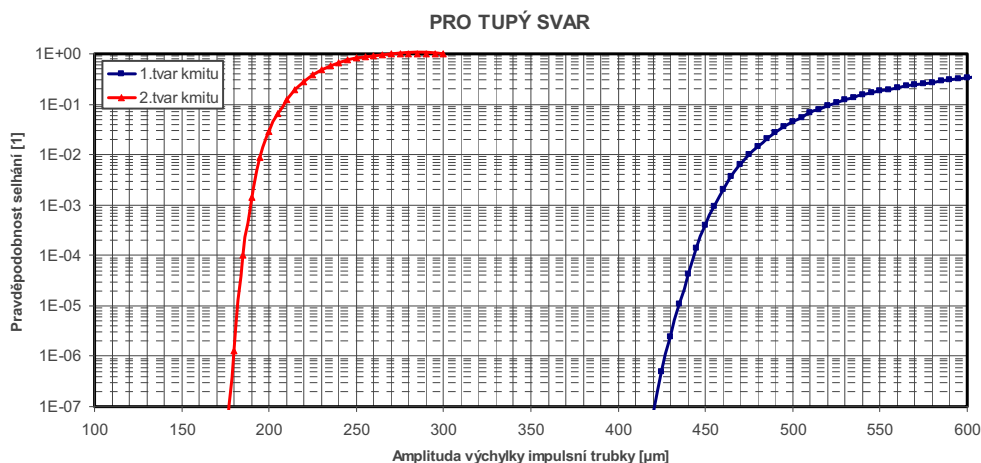
kde  $N$  je počet kroků simulace kdy hodnoty příslušné funkce  $RF$  vyhověly podmínce (8) a  $N_c$  je počet všech provedených kroků dané simulace.

Pravděpodobnosti poruchy v závislosti na konkrétně definované amplitudě dynamické odezvy příslušné oblasti impulsní trubky byly zhodnoceny pomocí numerických simulací Monte-Carlo programem Anthill<sup>TM</sup> [5] vyvinutým v rámci metody SBRA [6]. Pomocí tohoto programu lze generovat vstupní hodnoty dle daných předem definovaných rozložení hustoty pravděpodobnosti. Vstupním náhodně proměnným parametrem tedy byla hodnota spolehlivostní funkce  $RF$ . V každém kroku simulace byl programem vygenerován vektor vstupních náhodně proměnných veličin a ten pak byl skrze transformační model definovaný rovnicí (7) převeden na hodnotu veličiny výstupní. Celkem bylo v rámci simulace provedeno  $10^7$  simulačních kroků a v každém byla vyhodnocena hodnota funkce  $RF$ , po provedení všech kroků simulace byl pak získán histogram těchto hodnot (Obr. 3). Hodnotu amplitudy dynamické odezvy lze pak pro každý simulační výpočet inkrementálně měnit a následně pak získat závislost amplitudy a pravděpodobnosti selhání.

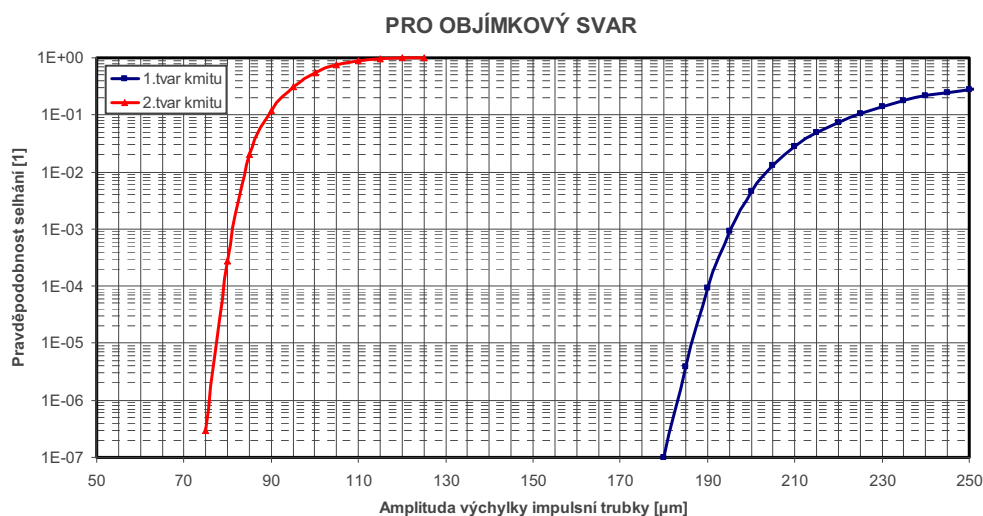


Obr. 3: Příklady výsledných Histogramů hodnot Spolehlivostních funkcí  $RF$ , čárkovaná čára znázorňuje limitní stav  $RF = 0$ , a) Objímkový svar, 1.tvar kmitu,  $Y_m^{dov} = 0,2$  mm; b) Tupý svar, 1.tvar kmitu,  $Y_m^{dov} = 0,45$  mm; c) Tupý svar, 1.tvar kmitu,  $Y_m^{dov} = 0,55$  mm; d) Tupý svar, 2.tvar kmitu,  $Y_m^{dov} = 0,19$  mm

Hodnoty pravděpodobnosti selhání impulsní trubky při dané konstantní hodnotě amplitudy kmitání lze rozdělit do dvou skupin, do první zařadíme části impulsního potrubí jenž obsahují objímkový svar a druhá pro oblasti pouze se svary tupými. Tyto skupiny lze dále členit do podskupin dle příslušného tvaru kmitu. Získané hodnoty výsledné pravděpodobnosti selhání potrubí z hlediska poškození vlivem gigacyklové únavy v závislosti na velikosti amplitudy kmitání jsou vyobrazeny na Obr. 4 pro tupý svar a Obr. 5 pro svar objímkový.



Obr. 4: Závislost pravděpodobnosti selhání na velikosti amplitudy kmitání pro oblasti impulsní trubky pouze s tupými svary



Obr. 5: Závislost pravděpodobnosti selhání na velikosti amplitudy kmitání pro oblasti impulsní trubky obsahující objímkový svar

Pro následné určení maximální dovolené výchylky, potřebné pro srovnání s naměřenými hodnotami, se již nemusí postupovat případ od případu, ale stačí zvolit její hodnotu dle požadované pravděpodobnosti selhání (s dostatečně zahrnutými vstupními nejistotami), pouze s rozlišením tvaru kmitání a typů svarů nacházejících se v posuzované oblasti na impulsním potrubí. Pro požadovanou pravděpodobnost  $10^{-6}$  vychází maximální dovolená výchylka, dle provedených výpočtů, pro oblast obsahující spoj pomocí objímkového svaru  $Y_m^{dov_1} = 183 \mu\text{m}$  a oblast pouze se svary tupými pak  $Y_m^{dov_2} = 427 \mu\text{m}$ . To však pouze za předpokladu kmitání odpovídající prvnímu tvaru kmitu. Pro kmitání s vyššími tvary kmitu, pak hodnoty dovolené výchylky značně klesají.

## Závěr

ASME Code Section III, Article NC 3622.3 vyžaduje, aby potrubí bylo navrženo (včetně podpor) tak, aby vibrace byly minimalizovány. projektová organizace je zodpovědná za to, že v průběhu předprovozních měření a počátečního provozu prokáže, že vibrace potrubí jsou menší než povolené limity. Ze statistiky poruch v USA JE za období 1961 ÷ 1995 [7] vyplynulo, že z celkového počtu 1 511 hlášených poruch bylo 364 případů pro potrubí o průměru  $\leq 1$  inch. Maximum se vyskytovalo v letech 1975 ÷ 1983. Je zajímavé, že datum přípravy a vydání normy [2] je datováno právě do tohoto časového intervalu.

Navržené metody měření mají co do odvození deterministický charakter, což je v souladu s požadavky dozorných orgánů, že licenční řízení musí být deterministické. Odvození dovolené rychlosti 12,7 mm/s má obecný charakter. Obsahuje četné konzervatismy a zdá se, že aplikace metody SBRA není vhodná. Výpočet dovolené výchylky je mnohem konkrétnější. Neurčitosti jsou zejména v typu okrajové podmínky, neboť ideální podpora je zřejmě nerealizovatelná. Rovněž únavová křivka má jako hlavní neurčitost neznalost zbytkových pnutí po svařování objímkovými nebo tupými svary. Zde je „živná půda“ pro aplikaci SBRA. Vydeme-li z požadavku, že pravděpodobnost porušení impulsní trubky musí být extrémně nízká, tj. menší nebo rovna  $10^{-6}$ , pak publikované výsledky určují přípustnou výchylku pro

první a druhý tvar kmitu. To je určitá výhoda před vibrační rychlostí, neboť při jejím odvození se tvar kmitu neuvažuje.

Lze tedy shrnout

- pro velká potrubí  $\varnothing$  100 a více se ukazuje jako výhodné použít vibrační rychlost,
- pro impulzní trubky se zdá být výhodnější přípustní výchylka.

V budoucnu bude provedena aplikace metody SBRA na vibrační rychlost.

### Literatura

- [1] ANSI B31.3, Power Piping, The American Society of Mechanical Engineering
- [2] ANSI/ASME-OM3, Preoperational and Initial Start-up Vibration Testing of NPP Piping Systems, 1982
- [3] Pečínka L., Vibrační rychlost nebo dovolená výchylka jako kritérium životnosti potrubí. National Colloquium Dynamika strojů 2000, ÚT ČSAV Praha, únor 2000
- [4] Filatov V.M., Fatigue of NPP Components and Piping under Service Conditions. Strength of Materials, The International Journal, № 1, 2004
- [5] Windows help file of program Anthill<sup>TM</sup> 2.5.0.1. Professional
- [6] Marek P., Brozzetti J., Guštar M., Tikalsky P., TEREKO – Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulations, Prague: Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic. Second edition, 2003. 471p., ISBN 80-86246-19-1
- [7] Bush S.H. et al, Piping Failures in United States NPP, 1961÷1995. SKI Report 96:20, January 1996