

Bedřich Heřmanský

Vliv jaderných elektráren na životní prostředí

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 25 (1980), No. 6, 324--333

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138193>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1980

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Zde  $u$  a  $v$  jsou vektory prostoru  $R$ . V naší úloze jsou to řídicí vektory. Můžeme libovolně volit jejich směr, ale jejich délky jsou omezeny podmínkami

$$|u| \leq \varrho, \quad |v| \leq \sigma.$$

Čísla  $\alpha, \beta, \varrho, \sigma$  jsou kladná. To znamená, že rovnice (10) popisují pohyb bodu s lineárním třením  $\alpha$  pod vlivem síly  $u$ , již můžeme volit libovolně co do směru, ale jejíž velikost nepřesahuje číslo  $\varrho$ . Podobné tvrzení platí i o veličině  $y$ . Na proces pronásledování můžeme pohlížet dvěma způsoby. Při prvním se ztotožňujeme s pronásledovatelem. Naše úloha tak spočívá v završení pronásledování výběrem vhodného řízení  $u$ . Během pronásledování stále pozorujeme chování prchajícího objektu. Při druhém způsobu se ztotožňujeme s prchajícím objektem a naše úloha spočívá v tom, abychom uprchli před pronásledováním výběrem vhodného řízení  $v$ . Při tom stále pozorujeme objekt, jenž nás pronásleduje. Základní výsledek, jenž zde platí, je tento:

1. Úloha pronásledování má vždy kladné řešení, tj. pronásledování lze dovést ke konci, jestliže jsou splněny dvě nerovnosti

$$(11) \quad \frac{\varrho}{\alpha} > \frac{\sigma}{\beta}, \quad \varrho > \sigma.$$

2. Úloha úniku má kladné řešení vždy tehdy, je-li splněna nerovnost

$$\sigma > \varrho.$$

Ukazuje se, že při řešení úlohy pronásledování v případě, kdy jsou splněny podmínky (11), vždy máme nejlepší způsob chování pronásledovatele, tj. existuje jediné optimální řízení pronásledovatele  $u(t)$ , od něhož každá odchylka nutně prodlužuje čas pronásledování. Při tom optimální řízení pronásledovatele  $u(t)$  se určuje postupně s průběhem času  $t$  a v závislosti na chování prchajícího objektu.

## Vliv jaderných elektráren na životní prostředí

*Bedřich Heřmanský, Praha*

27. června 1954 byla v Obninsku v SSSR uvedena do provozu první experimentální jaderná elektrárna. Ačkoliv její výkon 5 MW byl ve srovnání s dnešními elektrárnami malý, předznamenává novou etapu řešení energetického problému a lze ji považovat

za počátek mírového využívání jaderné energie ve světě. Za necelá tři desetiletí přechází období experimentálních prototypů v široký nástup průmyslových jaderných elektráren s tepelnými reaktory a podle některých odhadů dosáhne podíl jaderných elektráren na výrobě elektřiny ke konci století až 45%.

O rok později, v roce 1955, se také v Československu na základě smlouvy se SSSR otevřela možnost podílet se na rozvoji mírového využívání jaderné energie. Byly založeny potřebné řídicí, vědeckovýzkumné a pedagogické instituce: vznikla Československá komise pro atomovou energii, Ústav jaderného výzkumu, fakulta technické a jaderné fyziky (dnešní FJFI), byla zahájena výroba první čs. prototypové jaderné elektrárny. Za nový mezník lze považovat dohodu mezi ČSSR a SSSR z dubna 1970, na jejímž základě probíhá v ČSSR výstavba jaderných elektráren s reaktory typu VVER-440.

## 1. Rozvoj jaderné energetiky ve světě

Přes všechny obtíže provázející výstavbu průmyslových jaderných elektráren probíhá vývoj jaderné energetiky ve světě relativně rovnoměrně. Jak je vidět z obr. 1, dochází ke zdvojení instalovaného výkonu v jaderných elektrárnách za 3 až 4 roky. Poněvadž celková světová spotřeba elektřiny roste pomaleji, budou se jaderné elektrárny podílet na výrobě elektřiny ve stále větší míře. Podle velmi střízlivých odhadů IAEA dosáhne v roce 1985 podíl jaderných elektráren na instalovaném výkonu 11–13% (350–400 GWe). Podle [1] bude v tomto roce v provozu již 506 energetických reaktorů o celkovém výkonu 360 GWe.

Roste také jednotkový výkon reaktoru. Zatímco v roce 1965 byl průměrný výkon 1 reaktoru přibližně 100 MWe, dosahují dnešní tepelné reaktory výkonu 1300 MWe a průměrný výkon na 1 reaktor vzrostl na hodnotu 580 MWe.

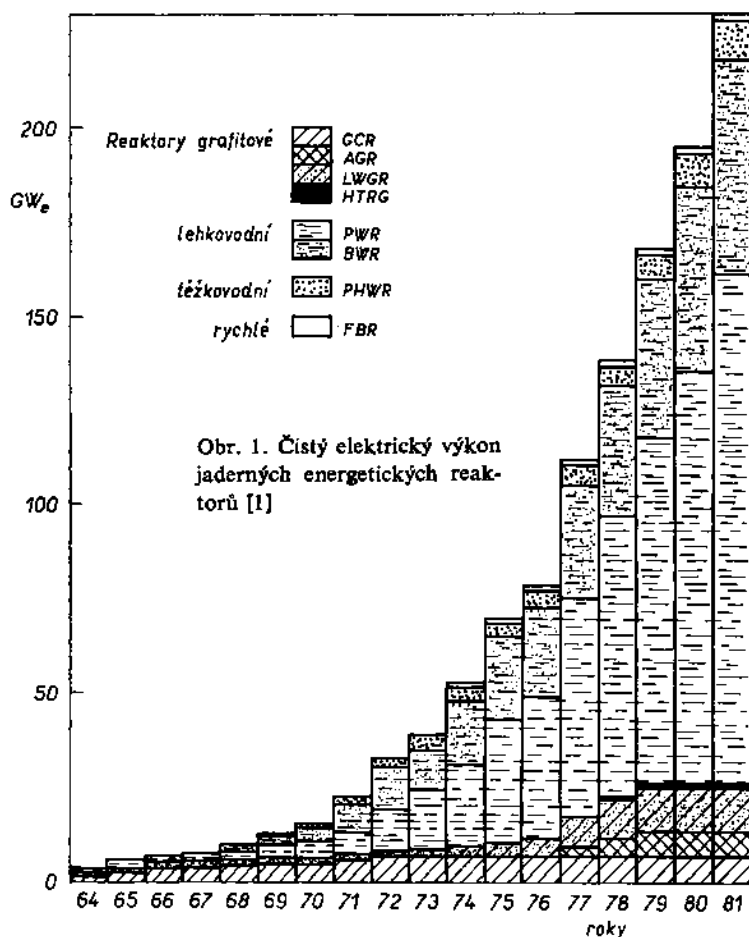
Pozoruhodná je rozmanitost v uspořádání jednotlivých typů. V principu je možno různou kombinací základních součástí konstruovat téměř neomezený počet nových typů reaktorů. Ve skutečnosti je však značný počet kombinací vyloučen z fyzikálních důvodů nebo na základě omezení, která vyplývají z ekonomických úvah nebo ze specifických podmínek v určité oblasti.

Pro posouzení typu reaktoru je z fyzikálního hlediska nejdůležitější neutronové spektrum. Jestliže má reaktor moderátor, způsobují štěpení uranu především tepelné neutrony a hovoříme o tepelných reaktorech. V současné době je převážná většina jaderných elektráren vybavena tepelnými reaktory. V reaktorech bez moderátoru se podílejí na štěpení hlavně rychlé neutrony a část neutronů je využívána k intenzivní tvorbě nového štěpeného materiálu. Pro tento typ se užívá názvu rychlý množivý reaktor.

Velký vliv na konstrukci reaktoru má volba moderátoru, chladiva a paliva. Jako moderátor je nejčastěji používána  $H_2O$ , dále grafit nebo  $D_2O$ . K odvodu tepla lze v principu užít některých moderátorů ( $H_2O$ ,  $D_2O$ ). V rychlých reaktorech se používají tekuté kovy (sodík). Mezi používaná plynná chladiva patří  $CO_2$  a hélium.

Na rozvoji jaderné energetiky ve světě se zatím podílí 8 základních typů reaktorů, jejich zastoupení je však – jak plyne z obr. 1 – velmi nerovnoměrné. Nejrozšířenějším

typem podle počtu jednotek i čistého elektrického výkonu jsou tlakovodní reaktory (PWR), moderované a chlazené obyčejnou vodou tak, že v aktivní zóně nedochází k varu vody. Podle [1] vzroste výkon těchto reaktorů v roce 1981 na 134 GWe a jejich podíl stoupne na 58,4%. Protože je předpokládána životnost reaktorů 20 až 30 let, je zřejmé, že tlakovodní reaktory budou hrát při výrobě elektřiny v tomto století stále významnější roli. Tlakovodní reaktor typu VVER je také základem čs. jaderné energetiky.



Druhým nejrozšířenějším typem energetického reaktoru jsou varné reaktory (BWR). Jsou rovněž moderované a chlazené obyčejnou vodou, ale na rozdíl od tlakovodních reaktorů dochází přímo v aktivní zóně k varu vody a vzniklá pára se přivádí na turbínu. Přestože výkon varných reaktorů dosáhne v roce 1981 přes 50 GWe, bude se jejich podíl na celkovém výkonu postupně zmenšovat ve prospěch tlakovodních reaktorů. Tento trend se však může změnit, neboť PWR i BWR dosáhly sice přibližně stejného vývojového stupně, ale k vyhodnocení předností a nedostatků chybějí dlouhodobé zkušenosti s provozem, spolehlivostí a bezpečností velkých jednotek.

Ani grafitové reaktory neztrácejí na významu. Původní britský magnoxový reaktor GCR byl vystřídán zdokonalenou verzí AGR, jejíž vývoj se však opozdil. Z celkového počtu plánovaných 10 jednotek je již 5 reaktorů v provozu a ostatní mají být dokončeny v nejbližší době. Další jednotky však nejsou plánovány a také Velká Británie se patrně zaměří na tlakovodní reaktory.

Dále se však rozvíjejí sovětské grafitové reaktory s tlakovými kanály, chlazené obyčejnou vodou (LWGR), odvozené od první experimentální jaderné elektrárny v Obninsku. V roce 1974, dvacet let po spuštění první jaderné elektrárny, byl uveden do provozu první blok leningradské elektrárny o výkonu 1000 MWe. V současné době je v provozu již 13 grafitových reaktorů tohoto typu a na příští desetiletí je v plánu výstavba dalších 16 jednotek, z nichž 2 mají mít výkon již 1500 MWe.

Mezi nejnadějnější koncepce patří vysokoteplotní reaktory moderované grafitem a chlazené héliem (HTGR). V západoněmecké experimentální jaderné elektrárně AVR o výkonu 13,5 MWe bylo již po řadu měsíců dosaženo výstupní teploty hélia 950 °C. Při spuštění amerického prototypu Fort St. Vrain o výkonu 330 MWe se objevila řada potíží, které však nejsou v zásadě důsledkem chybné koncepce a lze tedy očekávat, že se přednosti tohoto typu, dané vysokou výstupní teplotou hélia, časem prosadí.

Vývoj těžkovodních reaktorů je poznamenán rozmanitostí koncepce, danou především volbou chladiva a uspořádáním aktivní zóny. Plynně chlazené reaktory, vyvíjené v ČSSR a ve Francii, se neosvědčily. Ani švédský těžkovodní program založený na varném reaktoru s tlakovou nádobou nebyl realizován a tak pouze kanadský typ Candu na přírodní uran (PHWR) je i nadále perspektivní. Počet rozestavěných reaktorů, další plánované jednotky a zájem některých států ukazují, že přes značnou převahu lehkovodních reaktorů si kanadské těžkovodní reaktory udrží ve světové jaderné energetice své stálé místo.

Posledním perspektivním typem jsou rychlé množivé reaktory (FBR). Jejich význam spočívá především v tom, že umožňují energetické využití U238 a Th232 přeměnou na Pu239 a U233. Izotop U238 vzniká jako odpad při obohacování uranu a jeho světové zásoby neustále rostou. Energetický ekvivalent světových zásob toria je srovnatelný s energetickým ekvivalentem zásob uranu. Nasazením rychlých množivých reaktorů se tedy podstatně sníží vliv ceny přírodního uranu na cenu elektrické energie a bude ekonomicky přípustné využít i takové uranové zdroje, které dnes nemají průmyslový význam. Energetické zdroje takto zpřístupněné prostřednictvím množivých reaktorů jsou prakticky neomezené a rychlé množivé reaktory tak představují jednu variantu dlouhodobého řešení energetického problému.

## **2. Ekologické problémy rozvoje jaderné energetiky**

Při řešení problémů ochrany životního prostředí je v ohnisku světové pozornosti především jaderná energetika. Její rozvoj je v podvědomí lidí neustále spojován s hrozbou jaderných zbraní a s účinky ionizačního záření, které nelze vnímat našimi smysly; to pak vyvolává nejistotu. Značný vliv má jistě i to, že jaderná energetika patří mezi nej-

mladší obory lidského podnikání a vyvíjela se od samého počátku se silným zřetelem na bezpečnostní aspekty.

Při hodnocení vlivu jaderné energetiky na životní prostředí je nutné sledovat nejen provoz jaderných elektráren, ale celý palivový cyklus, který zahrnuje:

- dobývání a úpravu rud,
- výrobu palivových článků,
- provoz reaktoru,
- přepravování palivových článků,
- uložení radioaktivního odpadu,
- dopravu mezi jednotlivými uzly palivového cyklu.

Mnohé problémy jsou společné s fosilním palivovým cyklem, jsou to např. uvolňování velkého množství popílku a plynů při spalování uhlí nebo ekologické problémy dobývání uhlí či odpadní teplo. Specifickým problémem při využívání jaderné energie je však uvolňování radioaktivity a účinky ionizačního záření na obyvatelstvo, Poněvadž také v ČSSR je nutno počítat se stále vzrůstajícím počtem provozovaných jaderných elektráren, zaměříme se na ty otázky, které souvisejí s normálním provozem jaderných elektráren a s možností ohrožení životního prostředí při havárii reaktoru.

Jak bylo jednoznačně prokázáno, vyvolává ionizující záření u člověka rakovinu a projevuje se genetickými účinky. Všeobecně se předpokládá lineární vztah mezi dávkou a výskytem rakoviny, bez prahové hodnoty, nezávisle na dávkové rychlosti. Podle studie „Poradního výboru USA pro biologické účinky ionizujícího záření“ (BEIR Committee) připadá ročně 15 až 20 úmrtí na 1 milión osob následkem trvalého celoživotního ozařování ročním dávkovým ekvivalentem 1 mSv\* (0,1 rem). Této hodnoty je možno použít k výpočtu rizika úmrtí na rakovinu následkem trvalého vystavení určitých skupin obyvatelstva plynnému a tekutému odpadu z jaderných elektráren nebo jiných expozic v jaderném průmyslu [2]. Pro srovnání uvedme, že na celém světě každoročně umírá na rakovinu 1000 až 2000 osob z miliónu obyvatel.

Při hodnocení účinků jaderných elektráren na životní prostředí vycházíme ze skutečnosti, že radioaktivita je přirozenou součástí biosféry. Komplexní zhodnocení radioaktivity v životním prostředí je provedeno v práci [3]. Zde se konstatuje, že průměrná dávka ze všech přirozených zdrojů ionizačního záření činí v lidském organismu 1 až 1,3 mSv/r. Z dalších tzv. „civilizačních“ zdrojů ozáření má překvapivě vysoký podíl lékařské použití RTG a radionuklidů, které např. ve Velké Británii dosahuje téměř 50% celoroční dávky všech přirozených zdrojů. V USA je součet dávky od přirozených i civilizačních zdrojů radioaktivity přibližně 2 mSv/r. Celotělová krátkodobá dávka 3 až 5 Sv (tj. 3000 až 4000krát vyšší hodnota než celoroční dávka od přirozeného pozadí) by pravděpodobně způsobila úmrtí.

Při stanovení maximálně přípustných dávek pro obyvatelstvo se často vychází z hodnoty 5 mSv/rok, která byla doporučena „Mezinárodní komisí pro radiační ochranu“ (ICRP). Tato dávka odpovídá zvýšení rizika úmrtí o dalších 100 případů ročně z 1 miliónu

---

\* ) 1 Sv (sievert) = 100 rem.

nu obyvatel příslušné ozařované skupiny, tj. zvýšení o 5 až 10%. Je proto nutné důsledně uplatňovat zásadu o omezení úrovně umělé radioaktivity na tak nízkou úroveň, jaké je možno „rozumně“ dosáhnout při uvážení ekonomických a sociálních aspektů.

### 3. Nominální provoz jaderných elektráren

Radioaktivní odpad z reaktoru závisí na typu jaderné elektrárny a použitím systému manipulace s odpady. Hlavním zdrojem ionizačního záření, který se dotýká širokých vrstev obyvatelstva, jsou za normálního provozu plynné výpusti. Tyto exhalace můžeme rozdělit do 4 skupin:

1. Radioaktivní vzácné plyny, které vznikají jako produkty štěpení (Xe, Kr) nebo aktivací (Ar). Jsou nebezpečné jako zdroje vnějšího záření  $\beta$  a  $\gamma$ .

2. Radioaktivní izotopy jódu uvolňující se při pracovních teplotách z paliva. Jejich nebezpečí spočívá v tom, že se selektivně koncentrují ve štítné žláze.

3. Izotopy s dlouhým poločasem rozpadu H3 (12,8 let) a C14 (5730 let), které se v lidském organismu váží do genetického aparátu buněk.

4. Radioaktivní aerosoly štěpných produktů a z části i produktů aktivace, které se dostávají do potravinového řetězce.

Tekuté odpady zahrnují tritium, Cs 137, Cs 134, I 131, I 133, Co 58, Co 60 a aktivované korozní produkty, jako Cr 51, Mn 51 aj.

Největší podíl na lokální dávce z ozáření obyvatelstva mají radioaktivní plynné produkty. V exhalacích tlakovodních reaktorů dominuje Xe 133 (polčas 5,3 dne), který činí asi 90% celkové radioaktivity. Nejnebezpečnější jsou však izotopy jódu. Při pracovních teplotách paliva je jód těkavý a vyskytuje se v palivových povlácích v plynné podobě nebo ve formě aerosolů. Protože určitá část povlaků palivových elementů v tlakovodních reaktorech není hermetická (např. u amerických a západoevropských reaktorů je to v průměru 1% palivových prutů), proniká část plynných štěpných produktů do chladiva primárního okruhu a odtud netěsnostmi do reaktorového sálu. Radioaktivní xenon a krypton jsou pak odsávány ventilačním systémem do komína.

Analýza dostupných údajů ukazuje, že množství radioaktivních výpustí z jaderných elektráren vybavených tlakovodními reaktory je závislé na hermetičnosti palivových povlaků a rychlosti úniku chladiva netěsnostmi v primárním okruhu. Rozptyl v normované aktivitě výpustí jednotlivých jaderných elektráren je velmi značný a liší se až o 5 řádů. Nebylo jednoznačně prokázáno zvýšení aktivity výpustí v závislosti na délce provozu jaderných elektráren ani souvislost s procesem zdokonalování energetických reaktorů.

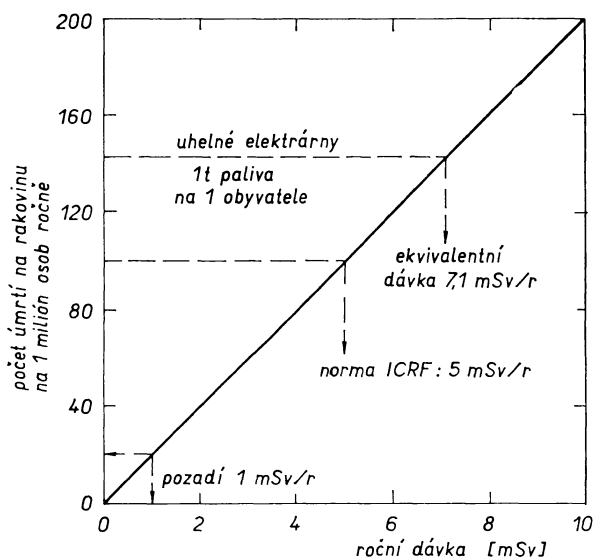
Technika zpracování plynných a tekutých radioaktivních výpustí z jaderných elektráren je v současné době na takové úrovni, že dávka záření přecházející na obyvatelstvo zůstává podstatně pod normou doporučenou ICRP. Tak např. odhadovaná celotělová dávka od záření způsobená vlivem normálního provozu lehkovodních reaktorů je v r. 1980 0,27  $\mu\text{Sv/r}$  na 1 obyvatele USA. Přitom je v USA v provozu více než 90 energetických reaktorů o celkovém výkonu přes 73 GWe. Očekává se, že s rozvojem jaderné

energetiky se tato dávka zvýší v r. 2000 na  $2,0 \mu\text{Sv}/\text{r}$  na 1 obyvatele. Lze proto odhadnout, že plně rozvinutá jaderná energetika může dosáhnout takové technické bezpečnosti konstrukce, že při vhodném umístění tak, aby některá skupina obyvatelstva nebyla vystavena příliš velkému množství exhalací z více elektráren, nezpůsobí větší zatížení než  $0,05 \text{ mSv}$  ročně. Tato dávka zahrnuje vnitřní i zevní expozici a tvoří asi 5% přirozené dávky ročně. Vycházíme-li z největšího odhadu 20 úmrtí na rakovinu na 1 milión osob a na  $1 \text{ mSv}$  ročně, znamená tato dávka jeden další roční případ úmrtí na rakovinu z 1 miliónu obyvatel příslušné ozařované skupiny. Ve srovnání s 1000–2000 osob z miliónu obyvatel, které na celém světě každoročně umírají na rakovinu, jde o statisticky bezvýznamný přírůstek 0,06%.

#### 4. Vliv uhelných elektráren na životní prostředí

V mnohých pracích se konstatuje, že vliv uhelných elektráren na životní prostředí je větší než vliv jaderných centrál. VOHRA [2] dokládá toto tvrzení výsledky podrobné analýzy, ze které vyplývá souvislost stoupajícího počtu úmrtí na rakovinu plic s rostoucím znečištěním ovzduší.

Podle současných odhadů způsobuje rakovina a srdeční choroby téměř 50% všech úmrtí a úmrtnost na tyto choroby se dále zvyšuje. Mnohé znečišťující látky v životním prostředí jsou karcinogenní povahy a mohou vyvolat rakovinu. Mezi tyto látky patří benzopyren, který vzniká ve značném množství při spalování uhlí a je přítomen i ve výfukových plynech aut. Rozbor provedený v Anglii a Walesu ukazuje, že úmrtnost na rakovinu plic se zvyšuje za 1 rok o 142 případů na 1 milión obyvatel a na 1 tunu paliva spotřebovaného na 1 osobu. Protože je specifická úmrtnost 750 případů ročně na 1 milión, jde o 19%ní přírůstek způsobený uhelnými elektrárnami (jaderné elektrárny



Obr. 2. Porovnání rizika rakoviny vyvolané radioaktivním zářením a činností uhelných elektráren [2]



představují přírůstek 0,06%). Jak je vidět z obr. 2, je vliv exhalací uhelných elektráren v uvažovaném případě ekvivalentní dávce 7,1 mSv/rok, což je 140krát více než předpokládaná zátěž z jaderných elektráren.

I když je nutno posuzovat uvedené závěry se značnou opatrností a s výhradami, neboť použitý výpočtový model má svá omezení, je vidět, že riziko rakoviny plic způsobené elektrárnami na uhlí je o jeden až dva řády vyšší než obdobné riziko v provozu jaderných elektráren.

## 5. Havárie s únikem radioaktivity

Tak jako v ostatních oborech průmyslové činnosti, dochází také v jaderném průmyslu k nehodám, které mohou být způsobeny konstrukčními nebo výrobními vadami různých technických zařízení, popř. chybnou obsluhou (lidský faktor). Následky takových selhání mohou vyvolat sled událostí, při kterých dojde k ohrožení životního prostředí únikem radioaktivity a zvláště plutonia. Velký tlak veřejného mínění na bezpečnost zařízení, mnohaleté zkušenosti a neustálá zdokonalování všech havarijních systémů však snižují pravděpodobnost havárie s následkem úniku radioaktivity u moderních elektráren na velmi nízkou úroveň.

Nejdůkladnější rozbor bezpečnosti, který byl dosud publikován, byl vypracován profesorem RASMUSSENEM z massachusettského Technologického institutu ve spolupráci s dalšími odborníky z univerzit a vládních organizací. Výsledky této studie jsou částečně znázorněny na obr. 3 a ukazují, že riziko vyplývající z havárie 100 provozovaných jaderných elektráren je hluboko pod rizikem způsobeným jinou průmyslovou činností a je zhruba srovnatelné s rizikem, které představuje pád meteoru.

Rasmussenova studie vyvolala velký ohlas, byl oceňován komplexní a seriózní přístup k řešení všech otázek souvisejících s bezpečností reaktoru, vyskytla se však také kritická stanoviska. Výsledky pravděpodobnostních studií je nutno brát s rezervou přinejmenším z těchto příčin:

1. Při výpočtu se vychází z určité technologické úrovně a z konkrétního uspořádání jaderné elektrárny. Výsledky odrážejí dosažený vývojový stupeň techniky bezpečnostních zařízení a havarijních systémů a nelze je jednoduše přenášet na jiné elektrárny.
2. Dosud je k dispozici málo statistických údajů o spolehlivosti velkých komponent.
3. Jsou málo prozkoumané některé jevy, k nimž by došlo při velké havárii (způsobení aktivní zóny, přenos tepla při havarijním dochlazování aj.).
4. Komplexní experimentální prověření teoretických studií je vzhledem k nepatrné pravděpodobnosti jevů prakticky nemožné.

Překvapivě malý počet nehod v dosud provozovaných jaderných zařízeních s vážnějším ohrožením životního prostředí svědčí o tom, že bezpečnosti jaderných elektráren byla věnována velká pozornost a na její zdokonalení vynaloženy velké prostředky. Jak uvádí HILL [4], dosahuje jaderný průmysl desetinásobně větší bezpečnosti než jiné energetické zdroje.

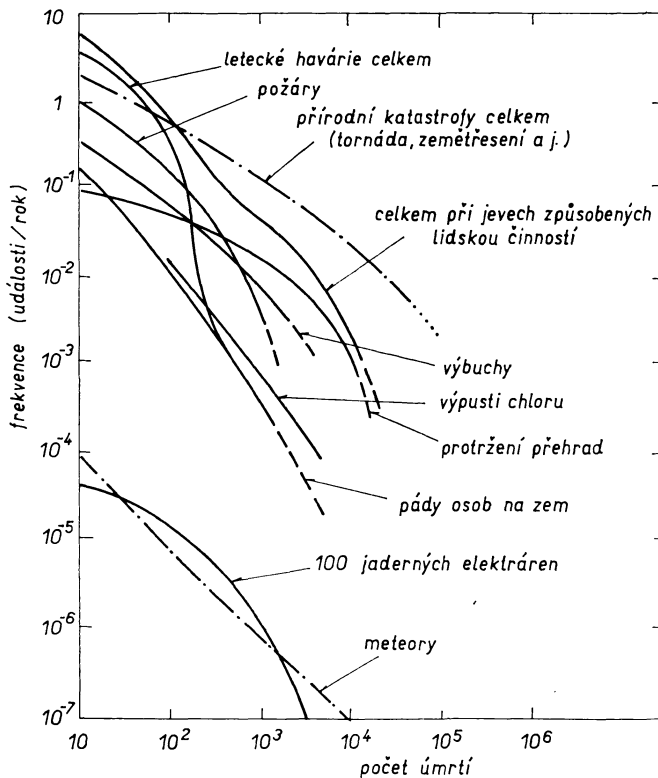
Určité konkrétnější závěry vyplynou patrně z důkladné analýzy havárie americké

jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem Three Mile Island, která se udála v nedávné době [6]. Při této závažné havárii došlo k velkému přehřátí aktivní zóny, jež bylo způsobeno ztrátou chladiva a asi polovina zirkoniových povlaků paliva byla zcela zničena. Velká část plynných štěpných produktů unikla do prostoru ochranné obálky, ale pouze nepatrné množství se dostalo do okolí. Při havárii nebyl nikdo zraněn ani zabit a ozáření okolního obyvatelstva byla bezvýznamné.

Za hlavní příčinu havárie označil J. HILL [5] to, že v rozporu s celým pojetím bezpečnosti elektrárny a s provozními předpisy byly uzavřeny ventily u tří nouzových napájecích, které měly dodávat vodu do parních generátorů při přerušení dodávky napájecí vody. Další průběh provozu byl patrně ovlivněn tím, že operátoři nesprávně ocenili situaci v reaktoru. Tento základní omyl vedl k celé řadě chybných opatření, která nakonec způsobila přehřátí aktivní zóny. Nepochopení skutečného stavu v reaktoru bylo pravděpodobně také příčinou zmatených a rozporných informací předávaných sdělovacím prostředkům.

Z dosavadních znalostí o průběhu havárie americké elektrárny lze vyvodit tyto dva závěry:

1. Nízké hodnoty pravděpodobností havárií velkých jaderných elektráren vyplývající z Rasmussenovy studie plně nerespektují chyby způsobené lidským faktorem. Porušo-



Obr. 3. Pravděpodobnost úmrtí při jevech způsobených lidskou činností a z přírodních katastrof v USA [4]

vání provozních předpisů, nesprávné pochopení situace, chybné rozhodnutí vyplývající z neznalosti komplexních dynamických vazeb v jaderné elektrárně mohou být mnohem častější příčinou havárie než selhání techniky. Lidský faktor je tak mnohostranný a má tak velký vliv, že může být stěžejně doceněn v pravděpodobnostních rozborech.

2. Přestože došlo k relativně velké havárii, která byla považována za nemyslitelnou, prokázal bezpečnostní systém s ochrannou obálkou plně schopnost zabránit úniku aktivity do okolního prostředí.

## 6. Závěr

Přes všechny obtíže provázející výstavbu velkých jaderných elektráren počet provozovaných jednotek exponenciálně roste a instalovaný výkon z jaderných centrální se ve světě každé 3 až 4 roky zdvojnásobuje. Více než polovina provozovaných jednotek jsou tlakovodní reaktory. Také v ČSSR je nutno počítat s rostoucím výkonem provozovaných jaderných elektráren s tlakovodními reaktory.

Normální provoz jaderných elektráren nevyvolává vážnější ohrožení životního prostředí a dávka z ozáření obyvatelstva ani v nejnepříznivějším publikovaném případě nepřesahuje v okolí jaderných elektráren 1% přirozeného pozadí.

Pravděpodobnost havárie spojené s následným větším únikem radioaktivity je u moderních jaderných elektráren vybavených ověřenými bezpečnostními systémy podstatně nižší než pravděpodobnost havárie v jiných průmyslových oborech. Předpokladem je však důsledné uplatnění bezpečnostních hledisek již v projektu elektrárny, dodržení vysoké technologické úrovně zajišťující dostatečnou spolehlivost všech komponent a neustálá péče věnovaná výcviku provozního personálu.

## Literatura

- [1] *Power reactors in member states*. 1978 Edition. IAEA. Vienna, 1978.
- [2] VOHRA, K. G.: *A perspective on the radiation protection: problem and risk analysis for nuclear era*. IAEA Bulletin 20, 1978, č. 5, s. 35,
- [3] PETR, I.: *Radioaktivita v životním prostředí minulosti, současnosti a budoucnosti*. Jaderná energie, 25, 1979, č. 12 s. 460—465,
- [4] HILL, J.: *Nuclear power in the public eye*. Atom 1978, No 257, s. 46—55,
- [5] HILL, J.: *The quest for public acceptance of nuclear power*. Atom 1979, No 273, s. 166—172.
- [6] HEŘMANSKÝ, B.: *Fakta o Three Mile Island*. Jaderná energie 26 (1980), č. 7/8, s. 282—285.