

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav stavebního zkušebnictví

Doc. Ing. Leonard Hobst, CSc.

**VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ VE STAVEBNICTVÍ
A ROZBOR MOŽNOSTÍ DALŠÍHO ROZVOJE
RADIČNÍCH METOD**

THE USE OF IONISING RADIATION IN CIVIL ENGINEERING
AND THE ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR THE NEXT
DEVELOPEMENT IN RADIATION METHODS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

radiografie, radioskopie, stínící konstrukce, ochrana před zářením, optimalizace stínění

KEY WORDS

radiography, radioscopy, shielding constuction, X-ray protection, shielding optimalization

Práce bude uložena v archivu Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1 ÚVOD..... | 5 |
| 2 VĚCNÝ PŘÍNOS VĚDECKÝCH PRACÍ Z RADIOGRAFIE A RADIOSKOPIE..... | 6 |
| 2.1 Betatronografie..... | 6 |
| 2.1.1 Výzkum vlastností betatronu PMB-6..... | 6 |
| 2.1.2 Výzkum účinku brzdného záření na filmy..... | 7 |
| 2.1.3 Vypracování expozičního nomogramu..... | 8 |
| 2.1.4 Návrh nové metody vyhodnocování betatronogramů..... | 9 |
| 2.1.5 Perspektivy dalšího vývoje..... | 10 |
| 2.2 Radioskopie..... | 11 |
| 2.2.1 Vybudování laboratoře pro radioskopii..... | 11 |
| 2.2.2 Zobrazení nehomogenit v reálném čase..... | 11 |
| 2.2.3 Vyřešení mechanického ovládání rentgen-televizního řetězce..... | 12 |
| 2.2.4 Počítačové zpracování obrazu..... | 12 |
| 2.2.5 Závěry výzkumu a zaměření další výzkumné činnosti..... | 13 |
| 3 VĚCNÝ PŘÍNOS VĚDECKÝCH PRACÍ Z OBLASTI STAVEBNÍ OCHRANY PŘED ÚČINKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ..... | 13 |
| 3.1 Vypracování programů pro výpočet stínění..... | 14 |
| 3.1.1 Vstupní údaje pro výpočet..... | 16 |
| 3.1.2 Sestavení programu STIN1..... | 16 |
| 3.1.3 Následné programy na výpočet stínění a jejich využití v praxi..... | 17 |
| 3.2 Vymezení stínících vlastností betonu..... | 17 |
| 3.2.1 Stínění z obyčejného betonu..... | 17 |
| 3.2.2 Účelnost použití těžkého betonu..... | 18 |
| 3.3 Kontrola stínící účinnosti stávajících betonových konstrukcí..... | 19 |
| 3.3.1 Princip radiometrické metody měření „z vývrtnu“..... | 19 |
| 3.3.2 Praktické ověření radiometrického měření objemové hmotnosti „z vývrtnu“..... | 21 |
| 3.4 Optimalizace systémů stavební ochrany proti účinkům ionizujícího záření lineárních urychlovačů..... | 21 |
| 3.4.1 Zásady a principy optimalizace stínění..... | 22 |
| 3.4.2 Zadání vstupních hodnot..... | 24 |
| 3.4.3 Sestavení programu pro výpočet objemu optimalizovaných stínících konstrukcí lineárního urychlovače..... | 24 |
| 3.4.4 Stanovení „optimální tloušťky“ stínící konstrukce..... | 25 |
| 3.4 Rozšířený výzkum v oblasti stínění proti úniku ionizujícího záření..... | 27 |
| 3.5.1 Přírodní a umělá radioaktivita..... | 27 |
| 3.5.2 Další zaměření výzkumu ochranných opatření..... | 27 |
| 4 ZÁVĚR..... | 28 |
| 5 VYBRANÉ PRÁCE AUTORA..... | 29 |
| 5.1 Publikace výsledků z oblasti radiografie..... | 29 |
| 5.2 Publikace výsledků z oblasti stavební ochrany před zářením..... | 30 |
| 6 ABSTRACT..... | 31 |

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Narodil jsem se 19. září 1949 v Brně. Střední všeobecně vzdělávací školu jsem ukončil v roce 1968 maturitou s vyznamenáním. Studium oboru „Konstrukce a dopravní stavby“ jsem absolvoval na Fakultě stavební VUT v Brně v roce 1973 (s červeným diplomem). Během vojenské základní služby jsem působil jako stavbyvedoucí na stavbě komplexu Vysoké školy pozemního vojska ve Vyškově. V období 1974–1978 jsem studoval jako interní vědecký aspirant na Ústředním středisku radiační defektoskopie VUT. Studium jsem ukončil úspěšnou obhajobou disertační práce. Odbornou praxi jsem vykonával v nár. podniku Hutní montáže Ostrava v letech 1978 až 1980. Jako samostatný defektoskopický pracovník jsem byl vyslán na odbornou stáž do NSR k firmě Gottfeld GmbH a později k firmě Omnitest GmbH. (Poznatky z tohoto pobytu jsem později využil při zavádění předmětu „Základní metody defektoskopie svarů“.) V roce 1980 jsem byl přijat na Ústřední středisko radiační defektoskopie jako odborný asistent. Po absolvování čtyřsemestrového postgraduálního studia na Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně jsem byl v roce 1984 jmenován znalcem v oboru „Stavebnictví, stavby obytné – nedestruktivní zkušebnictví“. Abych se zdokonalil v pedagogické odbornosti, absolvoval jsem v roce 1988 s výborným prospěchem čtyřsemestrový postgraduální kurz „Základy vysokoškolské pedagogiky“. V říjnu 1989 jsem byl jmenován docentem pro obor „stavební hmoty“. V roce 1991 jsem se stal vedoucím Ústředního střediska radiační defektoskopie. Od roku 1992 jsem „Autorizovaným inženýrem“ v oboru „zkoušení a diagnostika staveb“. V období 1997 až 2000 jsem zastával funkci prorektora VUT pro výstavbu a dislokaci (v této době bylo vybudováno Centrum VUT na ul. Antonínská 1). Po sloučení mnou vedeného „Ústavu radiační defektoskopie“ s „Ústavem stavební a zkušebních metod“ do společného „Ústavu stavebního zkušebnictví“ jsem byl jmenován zástupcem vedoucího a od roku 2004 vedoucím tohoto ústavu.

Podstatnou část svého pracovního úsilí jsem vždy věnoval výzkumné činnosti. Byl jsem odpovědným řešitelem 13 a spoluřešitelem 5 výzkumných úkolů. Své práce jsem zaměřoval převážně na využití ionizujícího záření ve stavebnictví a na problematiku ochrany proti účinkům ionizujícího záření. Výsledky výzkumu jsem uplatňoval v praxi. Vypracoval jsem 54 a podílel jsem se na zpracování 122 odborných posudků, zpráv a expertíz. S výsledky svých prací jsem seznamoval technickou veřejnost v téměř 100 článcích a příspěvcích. Usnadňovala mi to skutečnost, že po dobu 8 let jsem byl šéfredaktorem časopisu SANACE a od roku 2000 jsem zástupcem předsedy redakční rady časopisu BETON TKS. Byl jsem členem přípravných výborů a odborných komisí velkého počtu konferencí a sympozií jak doma, tak v zahraničí (Brazílie, Rumunsko, Slovensko). Kromě odborných stáží v NSR v letech 1979–1981 jsem absolvoval přednáškový pobyt na jaderné elektrárně v Cienfuegos na Kubě (1984) a krátkodobé stáže na Řízkém polytechnickém institutu (1986) a Technické univerzitě v Lipsku (1987 a 1989). V roce 1991 jsem pracoval v rámci tříměsíční stáže na Technické univerzitě v Lyngby (Dánsko).

Na pedagogické činnosti jsem se začal podílet již během své interní vědecké aspirantury. V 80. letech jsem částečně a v 90. letech v plném rozsahu přednášel v předmětu „Základy zkušebnictví“. Své přednášky jsem rozšířil o aktuální problematiku „ochrany proti radonu“. Podílel jsem se na modernizaci výuky zaváděním výukových videopořadů z oblasti nedestruktivního zkoušení materiálů (jsem spoluautorem 3 scénářů). Jsem konzultantem a oponentem diplomových prací a školitelem řady doktorandů.

Leonard Hobst

1 ÚVOD

Devatenácté století, označované jako „století páry“, bylo stoletím zásadních objevů a vynálezů, které byly dále rozvíjeny ve století dvacátém. V poslední dekádě 19. století objevil C. W. Roentgen neznámé „paprsky X“ a to byl velký impulz pro tehdejší vědu a techniku. Význam tohoto objevu oceňoval vědecký svět již za jeho života tím, že v roce 1901 mu byla udělena Nobelova cena za fyziku. O století později bylo navrženo, aby jeho jménem byl označen nově objevený chemický prvek s protonovým číslem 111 – **roentgenium**.

Fyzici a technici se snažili objasnit podstatu tohoto objevu, což se jim podařilo a během několika málo let se využívání ionizujícího záření dostalo prakticky do všech oblastí lidské činnosti. Využití rentgenového záření se uplatnilo nejdříve v lékařství, a to v diagnostice a později i terapii nemocí. Postupně jak se při zdokonalování rentgenových přístrojů zvyšovala energie rentgenového záření, rozšiřovaly se i oblasti jeho využití. Byla to především oblast strojírenství, kde se záření využívalo pro rentgenografickou kontrolu svarů a odlitků. Později začala rentgenografie pronikat i do dalších oblastí výroby a hospodářských aktivit.

Rozvoj jaderného výzkumu a průmyslu v období po 2. světové válce umožnil kromě výroby jaderných zbraní také vývoj a výstavbu jaderných reaktorů, které našly velké uplatnění především v energetice. V jaderných reaktorech však vznikají i umělé radioizotopy, které se v mnohých případech dají použít jako alternativní zdroje záření místo rentgenů. Právě umělé radioizotopy našly velké uplatnění při zavádění radiačních metod ve stavebnictví. Využívá se jejich snadná manipulovatelnost a nezávislost na zdrojích energie. Jejich využití je však podmíněno vývojem nových stínících krytů, které by byly bezpečné z hlediska stínění, snadno manipulovatelné a funkčně spolehlivé.

Požadavky na průzkum železobetonových konstrukcí a konstrukcí z předpjatého betonu v 70. letech narůstaly a především rostl požadavek na prozáření co největší tloušťky konstrukcí. To vyvolalo potřebu získat zdroje záření o velké energii. Této problematice jsem se tedy začal věnovat v polovině 70. let, kdy jsem nastoupil na ústav jako interní vědecký aspirant, v rámci své vědecké přípravy.

V 80. letech jsem se věnoval dalšímu kvalitativnímu rozvoji radiografie – radioskopii, která umožňuje stanovovat vnitřní strukturu materiálu v reálném čase. V rámci výzkumného úkolu se mi podařilo vybudovat na ústavu laboratoř pro radioskopickou kontrolu stavebních dílců.

V 90. letech se začala objevovat do té doby bagatelizovaná problematika škodlivého působení radonu na zdraví a jeho výskyt a šíření v obytných budovách. Problematice měření a ochrany před radonem jsem se věnoval opět v rámci výzkumného úkolu v první polovině 90. let.

Nové metody léčby onkologických onemocnění vyvolaly v polovině 90. let v naší zemi a na Slovensku požadavek na výstavbu řady lineárních urychlovačů, které produkují brzdné záření o vysoké energii. Na zpřesnění a urychlení výpočtu tloušťky stěn stínících konstrukcí jsem vypracoval speciální programy pro PC, které zahrnují různé vstupní podmínky. Tyto programy byly aplikovány při výpočtu stínění sedmi stínících konstrukcí ozařovačů a staly se i součástí řešení výzkumného úkolu o úložištích vyhořelého jaderného paliva.

Z výsledků svých prací k uvedené problematice radiační defektoskopie a využití ionizujícího záření ve stavebnictví předkládám vědecké a inženýrské práce charakteristické pro jednotlivé etapy mé vědecké a inženýrské činnosti:

- a) - **Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu**, závěrečná práce státního výzkumného úkolu P-12-333-224-E04-02-15-3, 1977 (radiografie).
- **Radiografie místních poruch stavebních konstrukcí v reálném čase**, závěrečná výzkumná zpráva, 1990 (radioskopie).
- b) - Soubor dílčích zpráv o řešení grantového projektu č. 103/93/0929 „Podzemní úložiště vyhořelého paliva z jaderných elektráren“, etapa „**Inženýrské bariéry podzemních jaderných zařízení**“ (1993 až 1995)(výpočet stínících konstrukcí).

- **Optimalizace stavebních ochran zdrojů ionizujícího záření**, Závěrečná zpráva pro SÚJB Praha, 1999 (optimalizace stínění).
- Soubor dílčích zpráv z řešení výzkumného úkolu **V-022 Tvorba pohody životního a pracovního prostředí školy**, období 1992–1995 (měření radonu a ochrana před radonem).

2 VĚCNÝ PŘÍNOS VĚDECKÝCH PRACÍ Z RADIOGRAFIE A RADIOSKOPIE

Vývoj techniky ve stavebnictví zákonitě směřuje k účinnějšímu využití materiálu všeho druhu, vede k tomu, že dřívější robustní stavby jsou nahrazovány subtilními stavbami z oceli, betonu a plastů, stejně tak jako byla např. málo výkonná vodní kola mlýnů nahrazována turbínami vodních elektráren. Tento vývoj byl podmiňován zvyšováním kvality použitého materiálu, ale zároveň také jistotou, že použitý materiál předpokládané vlastnosti, na kterých je založena spolehlivost, funkce a především bezpečnost budovaných moderních objektů, skutečně má a že byl použit v takovém rozvržení, jak to stanovuje projekt. Nástroj pro účinnou a spolehlivou kontrolu dodržování těchto požadavků poskytuje **radiografie** používaná již dlouhá léta nejčastěji na zjišťování profilu a polohy betonářské, resp. předpínací výztuže ve stavebních konstrukcích. Podle použitého zdroje ionizujícího záření dále členíme radiografii na gamagrafii, rentgenografii a **betatronografii**, která se v 70. letech 20. století stala nejvýkonnějším zdrojem ionizujícího záření.

2.1 BETATRONOGRAFIE

Betatrony jsou obdobně jako rentgeny zdroje s dočasnou emisí záření, ovšem s tím odlišením, že elektrony emitované z katody u nich nejsou urychlovány vysokým elektrostatickým polem jako u rentgenů, ale po kruhové dráze měnicím se elektromagnetickým polem. To umožňuje dosáhnout o několik řádů vyšší energie záření než se dosahuje u rentgenů.

První přenosný betatron vyvinuli vědci z Tomského polytechnického institutu a jeden z prvních sériových výrobků s označením PMB-6 byl získán na Ústřední středisko radiační defektoskopie VUT v Brně na výzkum státního úkolu P-12-333-224-E04-02-15-3 s názvem **Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu**, kterého jsem byl řešitelem. Výsledky této práce se staly základem mé kandidátské disertační práce.

Cílem práce bylo vyvinout novou účinnější metodu radiografie – betatronografii, vymezit podmínky její aplikace, vypracovat zásady pro její použití a tím přispět k jejich uplatnění ve stavebnictví pro snímkování konstrukcí ze železového a zejména předpjatého betonu. Výsledkem této práce bylo navíc vyvinutí nové vyhodnocovací metody oprostěné od nedostatků dosud používaných způsobů vyhodnocování radiogramů spočívajících v subjektivních nedostacích vyhodnocovatele, která by umožňovala přesně stanovit profil výztuže nejen z betonářské oceli, ale také ze svazků patentovaných předpínacích drátů (kabelů).

2.1.1 Výzkum vlastností betatronu PMB-6

Pro výzkum poskytnutý betatron PMB-6 (o max. energii 6 MeV) se skládá ze tří samostatných částí (obr. 1), které jsou propojeny kabely. Monoblok, ve kterém vzniká brzdné záření, má hmotnost 100 kg a jsou v něm umístěny elektromagnety, urychlovací komora a část elektroniky. Urychlovací komora je ze skla a její vnější průměr má 0,18 m. K monobloku je připojen kabelem o délce

10 m blok kondenzátorů o hmotnosti 65 kg. Jeho funkce spočívá v tom, že spolu s indukčností sekundárních vinutí elektromagnetů v monobloku tvoří rezonanční obvod, jehož kmitočet je blízký 50 Hz. Třetí částí je ovladač o hmotnosti 17 kg, který je k monobloku připojen kabelem o délce 25 m. Řídí se jím jak parametry prozařování, tak i doba expozice.

Výzkumem fyzikálních vlastností záření betatronu jsem sledoval především zákonitost zeslabení záření při průchodu libovolným materiálem (v *dalším textu je použito označení veličin tak, jak se používalo v době, kdy byla práce publikována*). Pro zeslabení záření betatronu platí obecně exponenciální rovnice zeslabení, ve které je vliv širokého svazku záření vyjádřen explicitně **vzrůstovým faktorem B**. Vzrůstový faktor B však pro betatron není tabelován, a tak jsem se rozhodl při výzkumech záření betatronu odvodit **efektivní hmotnostní součinitel zeslabení $\mu_{m,ef}$** , který implicitně zahrnuje vliv širokého svazku záření. Exponenciální rovnice zeslabení záření má pak tvar:

$$I = I_0 \times e^{-\mu_{m,ef} \times \rho \times d} \quad (1)$$

Z této rovnice se dá vypočítat expoziční příkon brzděného záření po průchodu materiálem I , ze známých hodnot I_0 (expoziční příkon nezeslaběného svazku záření), $\mu_{m,ef}$ (efektivní hmotnostní součinitel zeslabení), ρ (objemová hmotnost materiálu), d (tloušťka prozařovaného materiálu). Efektivní hmotnostní součinitel zeslabení má pro brzděné záření betatronu o nastavené energii 6 MeV hodnotu $\mu_{m,ef} = 0,00292 \text{ m}^2/\text{kg}$. Tato hodnota je platná pro různé materiály (byly odzkoušeny beton, ocel a žula).



Obr. 1 Betatron PMB-6 s příslušenstvím

2.1.2 Výzkum účinku brzděného záření na filmy

Po sérii experimentálních měření jsem zjistil, že expoziční rychlost brzděného záření betatronu je ve velké míře závislá na charakteristikách zabudované urychlovací komory. K tomuto poznatku jsem dospěl vzájemným porovnáním pěti různých urychlovacích komor postupně zabudovaných v betatronu.

Pro urychlovací komoru, která vykazovala nejvyšší expoziční rychlost záření, jsem zkoumal homogenitu svazku záření vycházejícího z betatronu. Výsledky výzkumu ukázaly, že záření betatronu má velmi nízkou homogenitu. Při práci s betatronem bylo v jeho okolí sledováno únikové záření, které má nepříznivý vliv na bezpečnost práce.

Jakost betatronogramů a doba expozice je příznivě ovlivňována zesilovacími fóliemi, popř. jejich kombinacemi, a proto značnou část výzkumu jsem zaměřil na stanovení právě tohoto vlivu. Jakost betatronogramů byla hodnocena s použitím normových měrek. Pro nejvýhodnější kombinace fólií (1 mm Pb + 0,2 mm Pb a 0,2 mm Pb + 0,2 mm Pb) byla určena charakteristika používaného radiografického filmu Indux R.

Prokázalo se, že část charakteristiky filmu má pro zčernání ležící v intervalu $D(0,7; 2,5)$ v semilogaritmické stupnici přímkový charakter. To umožnilo vyjádřit tuto část analyticky, exponenciální rovnicí zčernání.

$$D = \frac{1}{b} \times \ln \frac{1}{a} (E \times V) \quad (2)$$

Pomocí rovnice (2) lze vypočítat zčernání filmu D , pokud známe velikost expozice filmu E , konstanty filmu a a b a zesilovací faktor fólií V .

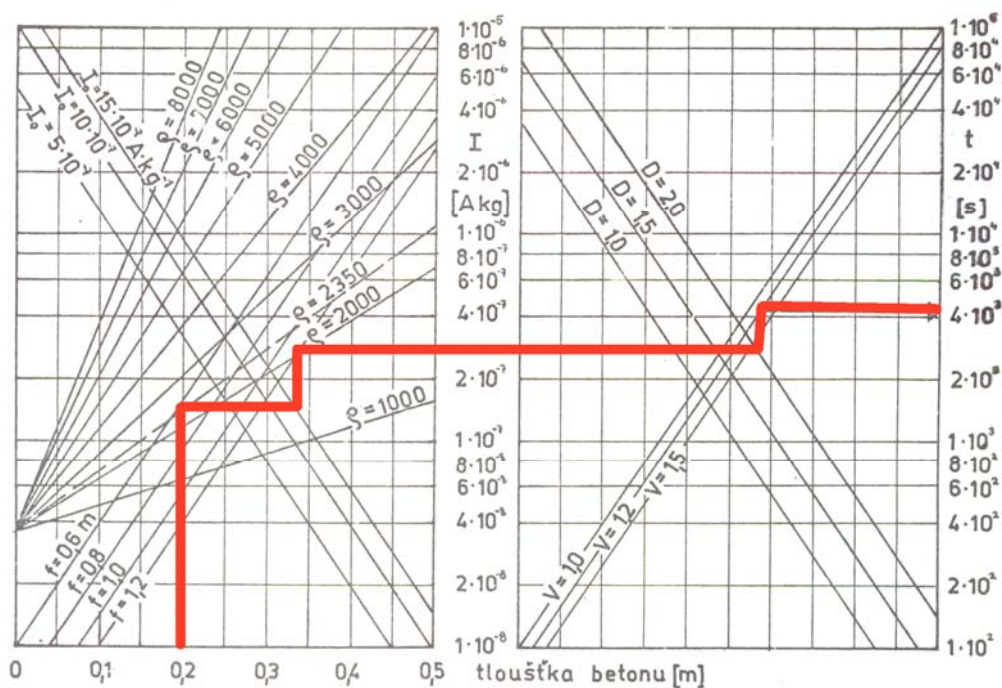
Pro film Indux R nabývají konstanty hodnot $a = 9,86 \cdot 10^{-5} \text{ C.kg}^{-1}$, $b = 1,316$. Zesilovací faktor V dosahuje u zesilovacích fólií 1 mm Pb + 0,2 mm Pb hodnoty $V = 1,2$ a pro fólie 0,2 mm Pb + 0,2 mm Pb hodnoty $V = 1,5$.

2.1.3 Vypracování expozičního nomogramu

Při betatronografických zkouškách na stavbách velmi záleží na správné volbě expoziční doby. Tyto zkoušky jsou náročné na přípravu a mnohdy jsou neopakovatelné. Nemůžeme se při nich spoléhat na rutinní odhad expoziční doby, ale tuto dobu musíme znát přesně. Proto jsem v rámci své práce z dosud získaných výsledků sestavil obecnou rovnici pro výpočet doby expozice, která obsahuje explicitně všechny parametry vyskytující se při snímkování. Především to je objemová hmotnost zkoumaného materiálu ρ , tloušťka tohoto materiálu d , ohnisková vzdálenost f , expoziční rychlost přímého svazku záření I a konstanty filmů a , b a zesilovací faktor fólií V .

$$t = \frac{f^2 \times a}{I_0 \times V} \times \exp(D \times b + 0,00292 \times \rho \times d) \quad [\text{s}] \quad (3)$$

Vyčíslení rovnice (3) pro každé snímkování by bylo vzhledem k množství uvedených určujících parametrů časově náročné, a proto jsem na jejím základě sestavil expoziční nomogram (obr. 2).



Obr. 2 Expoziční nomogram pro betatron PMB-6

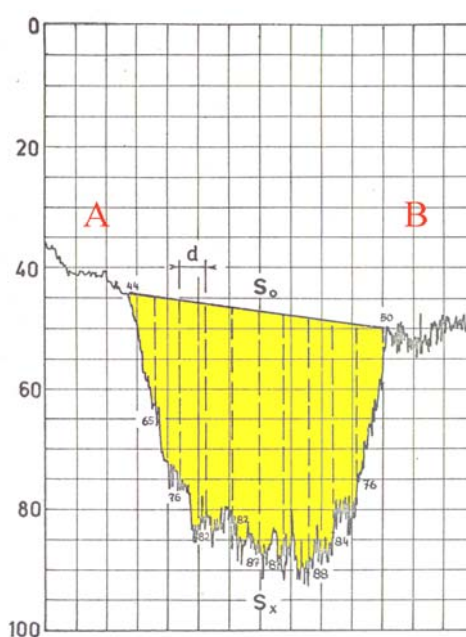
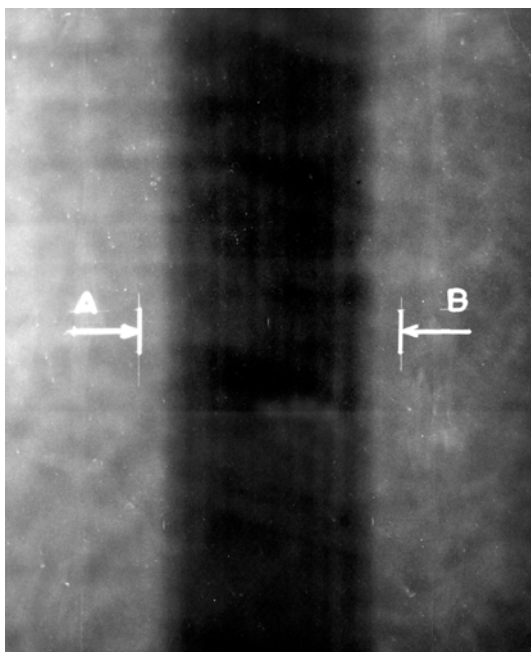
Nomogram usnadňuje a zrychluje výpočet doby expozice pro různé podmínky snímkování.

2.1.4 Návrh nové metody vyhodnocování betatronogramů

Konečnou fází betatronografické kontroly a výchozím podkladem pro určení stavu kontrolovaných staveb je vyhodnocení betatronogramů. Betatronogramy byly stejně jako ostatní radiogramy vyhodnocovány nejčastěji na negatoskopu.

Rozeznatelnost zachycených nehomogenit je při tomto způsobu ovlivněna nejen jakostí betatronogramu, ale také podmínkami vyhodnocování, zejména osvětlením snímku, absolutní velikostí pozorovaného pole a adaptací oka.

Proto jsem zaměřil své úsilí na vypracování metody, která by nahradila údaje získané osobním pozorováním, údaji zaznamenanými bez vlivu lidského činitele. K dispozici již byl registrační fotometr G II, jehož údaje, tzv. **denzitogramy** (obr. 4), jsou v podstatě grafickým znázorněním změn zčernání filmové emulze na betatronogramu (obr. 3). Základní podmínkou pro uplatnění



Obr. 3 Betatronogram předpínací výztuže

Obr. 4 Denzitogram předpínací výztuže

zvoleného principu vyhodnocování bylo odvození vztahů mezi plochou skutečné výztuže (pokud se zjišťovalo rozložení výztuže v železobetonové konstrukci nebo konstrukci z předpjatého betonu) a plochou zmenšeného zčernání, zjištěnou z denzitogramu. Vyvinutý přesný postup odvození plochy výztuže z údajů denzitogramu zhotoveného na zvoleném místě betatronogramu je patrný z obr. 4.

Dosažené výsledky byly i po odvození zmíněných vztahů zkreslovány účinkem **rozptýleného záření**, a proto musel být ještě stanoven součinitel pro zohlednění tohoto účinku β . Součinitel závisící na tloušťce prozařovaného materiálu d , ohniskové vzdálenosti f a vzdálenosti výztuže od filmu c byl odvozen experimentálně a z výsledků jsem sestavil matematický vztah pro jeho vyjádření.

Ze zjištěných závislostí jsem formuloval matematický vztah pro odvození plochy výztuže:

$$F = \beta \times K \times \frac{S}{n} \times \cos \omega \times \sum_0^{n-1} \left(\ln \frac{S_x}{S_0} \right)_n \quad (4)$$

kde F – odvozená plocha výztuže [cm^2],
 β – součinitel zahrnující vliv rozptýleného záření [1],
 K – vyhodnocovací konstanta [cm],
 s – šířka stopy výztuže odměřená na betatronogramu [cm],
 n – počet intervalů na denzitogramu [1],
 ω – odchylka kazety od roviny kolmé na osu svazku,
 S_x, S_0 – údaje registračního fotometru G II [1],

S použitím vztahu (4) lze pro různé podmínky snímkování určovat plochu výztuže s přesností závislou na počtu vyhodnocení výztuže z denzitogramu.

Správnost metody byla ověřena statistickým vyhodnocením více než sta snímků. Přitom bylo zjištěno, že chyba měření dosahuje při třech měřeních výztuže 14 %. Její vhodnost byla prokázána také praktickým stanovením množství a rozmístění předpínací výztuže na stavbách.

2.1.5 Perspektivy dalšího vývoje

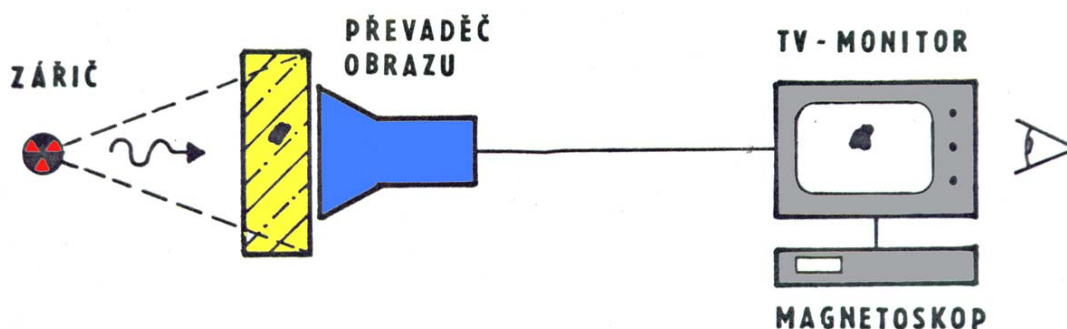
V 70. letech byly mobilní betatrony nejvýkonnější zdroje ionizujícího záření – bylo možné je použít pro prozařování betonových konstrukcí o tloušťkách do 50 cm. Postupně se však projevil i jejich nevýhody: velká hmotnost vlastního bloku zářiče, nestabilita energie záření při delší činnosti přístroje způsobená ohřevem polovodičových součástek v bloku zářiče, nehomogenita svazku záření. Větší byla i poruchovost ve srovnání s rentgeny a gamazářiči. V 80. letech byly navíc vyvinuty uranové kryty na přepravu radioizotopů, které umožňovaly použít radioaktivní kobalt Co60 o aktivitě (1 až 3 TBq), která byla srovnatelná s účinky brzdného záření přenosných betatronů z období 70. let. Význam a možnost využívání betatronů tehdejší konstrukce se zmenšil. Byly používány jen ve zvláštních případech – pokud bylo třeba zabezpečit malé ohnisko zdroje záření a musela se volit velká ohnisková vzdálenost.

Vývoj konstrukce betatronů však neustal. Zvýšila se frekvence procesu urychlování elektronů v prstencové komoře betatronů a elektronické obvody na bázi nových součástek zvýšily stabilitu provozu. Poslední typy betatronů (MegaScanTM7,5) dnes již umožňují prozařovat železobetonové konstrukce až do tloušťky 1 500 mm, a to při zachování nebo dokonce snížení hmotnosti jednotlivých částí betatronu.

K mobilním zdrojům záření o vysoké energii se ke konci 80. let začaly řadit i **lineární urychlovače**. Byly vyvíjeny původně pro stabilní defektoskopická pracoviště a zejména pro pracoviště onkologických ozařovačů. Lineární urychlovače však mají vyšší hmotnost nežli betatrony, a proto vyžadují při nasazení instalaci dálkově ovládaného mechanického zařízení umožňujícího nařízení polohy lineárního urychlovače do požadované polohy pro prozařování. Začátkem 90. let byly vyvinuty a odzkoušeny první převodníky obrazu, které umožňují sledovat nehomogenity a vady materiálu přímo – v reálném čase. A právě radiografie v reálném čase – **radioskopie** se na počátku 90. let stala perspektivní metodou, jejíž zavedení do praxe přispělo ke zrychlení průzkumu a snížilo náklady vyvolané spotřebou radiografických filmů.

2.2 RADIOSKOPIE

Radioskopie představuje kvalitativně vyšší stupeň v rozvoji radiační defektoskopie (obr. 5). U radioskopie se využívá buď přímého převodu záření na viditelné světlo, které je snímáno tele-



Obr. 5 Schéma rentgen-televizního řetězce na zjišťování vad v materiálu

vizní kamerou, anebo obraz je přímo zaznamenáván polovodičovými detektory a převáděn na zpracování do počítače.

Na Ústředním středisku radiační defektoskopie jsme tedy v rámci státního výzkumného úkolu II-3-1/12-E 04 03 v letech 1989 až 1990 vyřešili problematiku rentgen – televizního řetězce i pro potřeby stavebnictví. Výzkumný úkol, jehož jsem byl odpovědným řešitelem, měl název:

Radiometrie fyzikálních a mechanických vlastností stavebních materiálů a konstrukcí (Radiografie místních poruch stavebních konstrukcí v reálném čase).

2.2.1 Vybudování laboratoře pro radioskopii

Cílem řešení části tematického zaměření výzkumného úkolu bylo vybudování typové aplikační laboratoře v prostorách ústavu, která by umožnila okamžitou kontrolu a hodnocení stavebních dílců. Řešení úkolu bylo zaměřeno na kontrolu plošných stavebních konstrukcí, které však bylo nutno dopravit do laboratoře na zkušební dráhu. Soustředoval jsem se na využití moderní počítačové techniky jak pro řízení posuvů zkoušených stavebních dílců, tak pro úpravu a vyhodnocování radioskopických obrazů.

2.2.2 Zobrazení nehomogenit v reálném čase

Rentgen-televizní řetězec byl na ústavu sestaven z dostupných zařízení. Hlavní součást rtg-TV řetězce – převaděč obrazu – byl tuzemské výroby ZOX-193 KM, což byl převaděč obrazu používaný v lékařství upravený pro použití v defektoskopii. Vstupní pole tohoto převaděče bylo kruhové a mělo průměr \varnothing 180 mm.

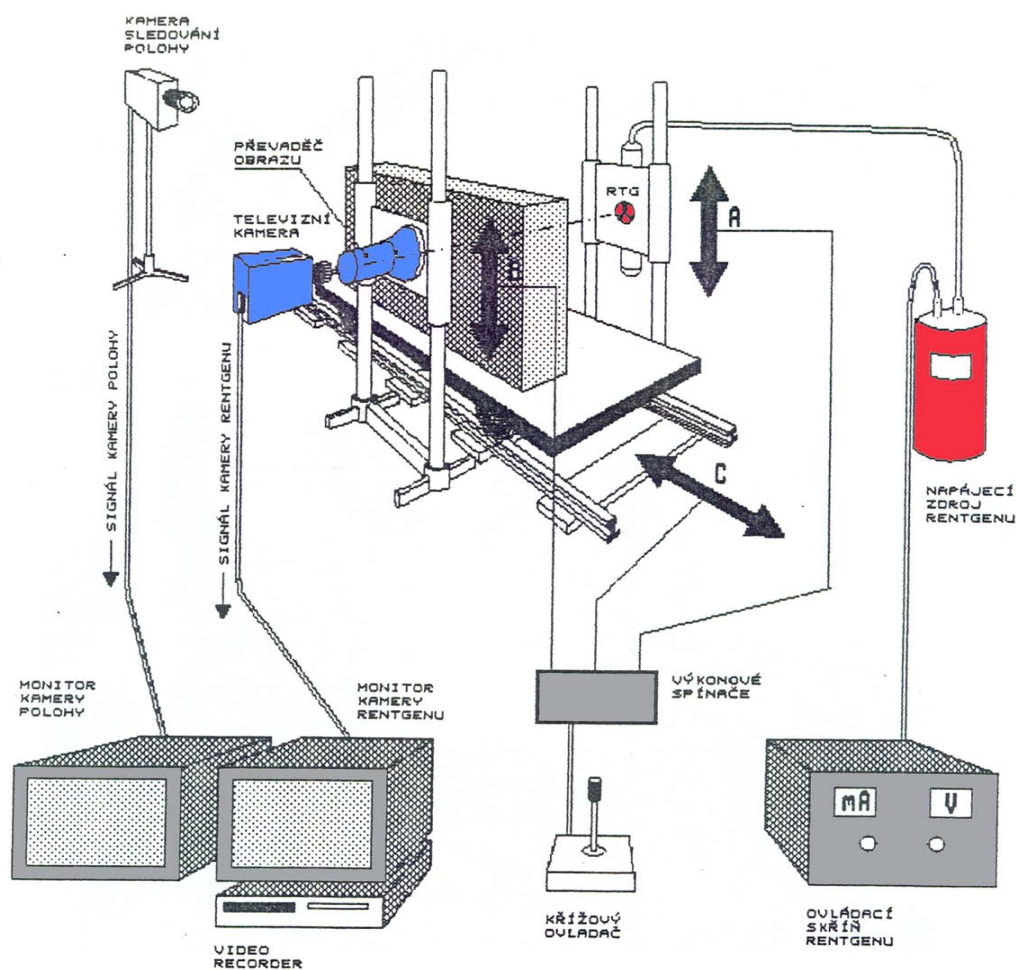
Jako zdroj záření byl použit rentgen od firmy Andrex CP-160, který je ve vybavení ústavu. Radioskopický obraz při použití tohoto rentgenu má i s tuzemským převaděčem ZOX-193 KM velkou rozlišitelnost (0,6 až 0,8 %), avšak maximální napětí na rentgence 160 kV umožňuje prozářit beton pouze do tloušťky 190 mm.

Vstupní měření však prokázala, že převaděč obrazu není příliš vhodný pro použití ve stavebnictví, neboť neumožňuje registraci záření o vyšší energii, které je nezbytné pro prozařování betonových konstrukcí větších tloušťek.

2.2.3 Vyřešení mechanického ovládání rentgen-televizního řetězce

Na umožnění systematického zkoumání železobetonových dílců byl navržen systém mechanického posuvu jednak samostatných dílců, které jsou značně hmotné, a jednak části rtg-TV řetězce. Zkoušený dílec se pohybuje pouze ve vodorovném směru zařízením poháněným výkonným elektromotorem. Ve svislém směru se posouvají méně hmotné části řetězce – rentgenka a převaděč obrazu pomocí dvou synchronně řízených elektromotorků (obr. 6).

Navržená sestava umožňuje rychle dosáhnout a kontrolovat libovolné místo plošné konstrukce. Řízení posuvu na dálku se s úspěchem ověřilo jak ručně pomocí „křížového ovladače“, tak s použitím počítače, který též zajišťuje další funkce, jako je zabezpečení krajních poloh posuvu a vyznačení kontrolovaného místa na monitoru obrazovky .



Obr. 6 Hlavní konstrukční části laboratoře pro radioskopii

2.2.4 Počítačové zpracování obrazu

Velkou perspektivu pro radioskopii představuje použití výpočetní techniky – digitalizace a následné numerické zpracování obrazu. Výhody počítačového zpracování však nebylo možné v průběhu našich výzkumných prací plně ověřit, protože počítač ECLIPSE DATA GENERAL, který byl získán ústavem, měl poměrně malý rozsah pole pro zobrazení digitalizovaného obrazu (256 × 256 bodů), takže umožňoval zpracovat pouze malou vybranou část obrazu. Postupná integrace

„stejných“ obrázků a tím zdůraznění nehomogenit a naopak potlačení „šumu“ u daného počítače byla velmi omezena.

2.2.5 Závěry výzkumu a zaměření další výzkumné činnosti

a) Využití záření o vysoké energii

Další vývoj radioskopie je nutno zaměřit s ohledem na požadavky na prozařování materiálů velkých tloušťek, na oblast využití vyšších energií záření. K tomu mohou být použity mobilní beta-trony a lineární urychlovače, jejichž vývoj ve světě dále pokračuje.

b) Digitalizace radiografického obrazu a jeho počítačové zpracování

V posledních letech byly vyvinuty nové citlivé materiály, ze kterých jsou zhotoveny deskové převaděče obrazu schopné zaznamenat vysokoenergetické záření gama od kobaltu Co60, nebo brzdného záření betatronů a lineárních urychlovačů. Právě oblast záznamu a digitalizace radiografického obrazu je náplní vědecko-výzkumné činnosti Střediska radiační defektoskopie a tyto práce by se měly rozšířit v rámci zapojení ústavu do Výzkumného záměru v letech 2005 až 2010.

Ve vývoji jsou prakticky tři systémy, které umožňují digitalizaci radiografického obrazu s následným počítačovým zpracováním a archivací:

α) Digitalizace stávajících radiografických filmů scannery

Byly vyvinuty speciální scannery, které umožňují digitalizovat snímky do vysokých hodnot zčernání $D=4$. Cílem digitalizace není přitom jenom archivace radiografických snímků, ale i následné počítačové zpracování obrazu poskytující možnost upravit některé parametry obrazu, např. zvýšit kontrast.

β) Využití polovodičových detektorů

Polovodičové detektory se jeví jako nejperspektivnější zobrazovací systémy. Jejich nevýhodou je vysoká cena a vysoké nároky na zacházení. Navíc jsou také ovlivňovány teplotou pracovního prostředí. Podle způsobu zobrazování se rozlišují systémy s přímou konverzí záření (na bázi amorfního selenu) nebo nepřímou konverzí záření (na bázi amorfního silicia).

Obecně platí, že polovodičové detektory na bázi amorfního silicia mají větší rozlišení, avšak proti detektorům na bázi amorfního selenu mají menší dynamiku (dynamikou se rozumí citlivost v široké oblasti energií).

γ) Paměťové fólie

Paměťové fólie, tj. fólie na bázi fosforu, se vkládají do kazet, obdobně jako rentgenové filmy. Při dopadu rentgenového nebo gama záření jsou na nich vybudeny elektrony v krystalické struktuře fólie a ty se posouvají do vyšších energetických vrstev, kde zůstávají v kvazistabilním stavu. Ve speciálním scanneru, do kterého se exponovaná fólie vkládá, se tyto elektrony pomocí laserového svazku uvolňují, takže ve fluorescenční vrstvě vznikne viditelný obraz, který je sejmut a digitalizován. Paměťové fólie mají velkou dynamiku, což je výhodné při prozařování materiálů o různých tloušťkách. Právě tato jejich vlastnost dává předpoklad, že paměťové fólie budou při zkouškách stavebních konstrukcí vhodnou náhradou radiografických filmů.

3 VĚCNÝ PŘÍNOS VĚDECKÝCH PRACÍ Z OBLASTI STAVEBNÍ OCHRANY PŘED ÚČINKY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

V 70. a 80. letech se v průmyslu a lékařství začaly využívat zdroje záření o vysoké energii (6 až 25 MeV), a to nejenom v defektoskopii v souvislosti s kontrolou strojírenských výrobků používaných v jaderné energetice, ale zejména v lékařství při léčení onkologických onemocnění. Tyto

zdroje záření, ve většině případů lineární urychlovače, jsou však hmotná zařízení, která musí být umístována v objektech splňujících řadu speciálních požadavků. Zásadním požadavkem je účinné odstínění nejenom přímého svazku primárního záření, ale také sekundárního záření vznikajícího na zkoušených výrobcích nebo na pacientovi po dopadu primárního svazku tak, aby nedošlo k překročení úrovně dané bezpečnostními předpisy.

Právě na kontrolu objemové hmotnosti betonu stínících konstrukcí lineárních urychlovačů se daly úspěšně aplikovat v ústavu vyvinuté radiometrické přístroje a pracovníci ústavu se proto v těchto letech podíleli na kontrole řady budovaných stínících konstrukcí. Jako podklad pro kontrolu měření objemové hmotnosti byly přitom obvykle předkládány výsledky výpočtu dodávané objednavateli (investory).

Tyto výpočty ale nezohledňovaly místní podmínky z hlediska výrobních možností betonáren na výrobu betonu požadované objemové hmotnosti. Mnohdy jsem se setkával s tím, že jako vstupní údaj návrhu byla např. uvažována tabulková hodnota objemové hmotnosti 2350 kg/m^3 (v suchém stavu), kterou však místní betonárny nebyly schopny docílit. Přitom ale investor odmítal připustit kompenzaci snížení objemové hmotnosti stínící stěny zvětšením její tloušťky s poukazem na závaznost dodržení výpočtové tloušťky a mnohdy to ani s ohledem na napojení na stávající objekty nebylo možné.

Tato skutečnost vyvolala nutnost doplnit náplň ústavu o řešení problematiky navrhování stínících konstrukcí. Náplň řešení se stalo prošetření a zhodnocení všech vstupních parametrů, tj. dávkového příkonu zdroje záření, jeho polohy ve vztahu k navazujícím objektům a zejména pokud jde o stínící beton charakteristiky kameniva z místních zdrojů, popř. dostupnost a kapacita zdrojů speciálních složek pro výrobu směsí těžkého betonu (barytové kamenivo, železná ruda apod.). Na zkvalitnění návrhu byly potom vytvořeny výpočtové algoritmy umožňující vypočítat stínění v dané konstrukci v alternativách pro různé druhy stínících materiálů tak, aby mohla být vybrána optimální varianta jak po bezpečnostní, tak po ekonomické stránce.

Význam této práce se projevil zvláště při navrhování zesílení účinnosti stínění na stávajících konstrukcích, do kterých jsou při modernizaci instalovány nové lineární urychlovače s vyšším výkonem za současně uplatňované povinnosti dodržovat stále se zpřísnující bezpečnostní předpisy. U těchto konstrukcí je také zvláště důležité zodpovědně zjistit stávající skutečnou stínící účinnost a tu zahrnout do výpočtu bezpečného dostínění.

Uvedené problémy jsem začal řešit od začátku 90. let.

Jako **první postupný cíl** jsem si vytknul sestavení programu, který by umožnil rychlý výpočet stínících konstrukcí ze zadaných vstupních údajů. Pokud nejsou k dispozici, vypracoval jsem systém pro získání a výběr vstupních údajů, v daných okolnostech s největší pravděpodobností, odpovídající skutečnosti.

Jako **druhý cíl** jsem si zvolil vypracovat metodu pro hodnověrné vymezení výpočtových hodnot betonů jako základního staviva pro stavbu stínících konstrukcí.

Jako **třetí postupný cíl** jsem si zvolil vyvinutí metody nedestruktivního určení charakteristik a funkčních hodnot stávajících stínících konstrukcí, kterou je nezbytné znát nejenom pro přípravu zodpovědného projektu každého jejich zesílení a zdokonalení před montáží nových výkonnějších zdrojů záření, ale také pro zabezpečování aktuální hodnověrné kontroly životního prostředí.

Po dosažení těchto cílů jsem si vytknul **čtvrtý cíl** – vypracovat objektivní metodu, jak optimalizovat návrh stínící konstrukce tak, aby náklady na její výstavbu při zachování radiační bezpečnosti, stanovené zákony a předpisy byly co nejnižší.

3.1 VYPRACOVÁNÍ PROGRAMŮ PRO VÝPOČET STÍNĚNÍ

Problematiku výpočtu stínících konstrukcí jsem zařadil do svého programu jako první a v té souvislosti jsem si také upravil náplň své tříměsíční stáže na Technické univerzitě v Lyngby (Dán-

sko) v roce 1992. Na Ústavu fyziky hostitelské univerzity jsem se zabýval problematikou neutro-
nové aktivační analýzy, která s problematikou stínění okrajově souvisí. Nalezl jsem zde podporu
svého záměru zabývat se problematikou stínění a získal jsem možnost přístupu ke světové literatu-
ře a zejména také k souhrnně zpracovaným výsledkům měření a k předpisům zabývajícími se stí-
něním. Zahájil jsem tam tvorbu příslušných výpočtových algoritmů vhodných pro následné pro-
gramování a shromáždil jsem a do programu uložil databázi vlastností materiálů používaných pro
stínění. V této práci jsem potom pokračoval i po ukončení stáže a vzniklé programy jsem postupně
inovoval na základě nových poznatků o stínících materiálech, a to již s přihlédnutím k zpřísněným
bezpečnostním předpisům.

Při studiu zahraničních předpisů zabývajícími se problematikou stínění, a to především zpráv
komise International Commission on Radiological Protection (ICRP 15, ICRP 21, ICRP 33) a ko-
mise National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP 49), jsem poznal, že
tyto předpisy jsou založeny na výpočtu zjednodušenou metodou, která vychází z tabulek, v nichž
každý stínící materiál je charakterizován svojí desetinnou tloušťkou $d_{1/10}$ (tloušťka materiálu, která
zeslabí dávkový příkon záření na 1/10 původní hodnoty) pro danou energii záření. Podle požado-
vaného zeslabení dávkového příkonu záření se pak volí příslušný počet desetinných tlouštěk stíni-
cího materiálu.

Tento postup výpočtu jsem se snažil ověřit pro různá zadání vstupních hodnot a pro výpočet
jsem použil exponenciální rovnici zeslabení pro široký svazek záření tvaru:

$$\dot{D} = B \times \dot{D}_0 \times e^{-\mu_m \times \rho \times d} \quad (5)$$

kde \dot{D} – dávkový příkon zeslabeného širokého svazku záření [mGy/h],

B – vzrůstový faktor [1] (hodnota B je tabelována),

\dot{D}_0 – dávkový příkon nezeslabeného svazku záření [mGy/h],

μ_m – hmotnostní součinitel zeslabení [m^2/kg] (je závislý na energii E),

ρ – objemová hmotnost stínícího materiálu [kg/m^3],

d – tloušťka stínícího materiálu [m].

Výpočty logicky prokázaly, že účinnost desetinných tlouštěk stínění roste s jeho zvyšující se
celkovou tloušťkou d . Hodnota první desetinné tloušťky směrem od zářiče je proto o cca 50 % vyš-
ší než následující desetinné tloušťky stínění. Až průměrná hodnota ze šesti po sobě následujících
desetinných tlouštěk se rovná tabulkové hodnotě uváděné v mezinárodních předpisech. Při vý-
počtech stínění velkých tlouštěk (nad 1,5 m) je tato tabulková hodnota desetinné tloušťky $d_{1/10}$ do-
statečně bezpečná, ale u malých tlouštěk stínění (kolem 0,5 m), které se též vyskytují v návrzích
stínících konstrukcí, by docházelo k nejistotě o dostatečnosti zvolené tloušťky stínění (stínění by
mohlo být poddimenzováno).

Pro vypracování programu výpočtu stínění jsem se proto rozhodl použít výše uvedenou expo-
nenciální rovnici zeslabení pro široký svazek záření. Jako programovací jazyk jsem použil GW-
BASIC, který byl nainstalován na počítačích Ústavu fyziky v Lyngby. Jako cíl jsem si vytknul
vytvořit univerzální program výpočtu stínění při použití různých materiálů stínění, a to pro energie
brzdného záření lineárních urychlovačů od 0,5 do 25 MeV. Strukturu programu jsem rozdělil na
řadu etap (podprogramů) řešících dílčí problémy, které jsem pak po jejich sestavení a ověření po-
stupně do programu přidával, a tím zvyšoval univerzálnost jeho využití.

3.1.1 Vstupní údaje pro výpočet

Ze studia podkladů umožňujících sestavení programu pro výpočet stínění je zřejmé, že právě odpovědně stanovení vstupních údajů má rozhodující vliv na správnost výpočtu. Tento můj názor se později v praxi vždy potvrdil. Vstupní údaje pro výpočet stínění jsou:

- a) předpokládané **týdenní vytížení** W ozařovače [Gy/týden] (je uvažováno v 1 m od ohniska),
- b) pravděpodobná délka pobytu osob za stínícími konstrukcemi – **faktor doby pobytu** T [1],
- c) směr orientace primárního svazku záření ozařovače během jeho činnosti – **faktor směru** U [1],
- d) uvažovaný bezpečný příkon dávkového ekvivalentu (od směrné hodnoty po limit) ve stanoveném **dozimetrickém bodu** – H [mSv/týden],
- e) druh záření (primární, sekundární) a vzdálenost **dozimetrického bodu** (místa, kde je měřeno záření) od ohniska zářiče – L [m],
- f) maximální energie emitovaného záření lineárního urychlovače E [MeV],
- g) objemová hmotnost stínícího materiálu (nejčastěji betonu) ρ [kg/m³].

Pozn.: Místo týdenního vytížení W ozařovače lze použít kermový příkon K záření při zapnutém ozařovači v 1 m od ohniska [Gy/min.] vynásobený dobou využití ozařovače za týden.

Jako základní údaj zahrnutý do návrhu dimenzování stínění jsem zvolil hodnotu **násobnosti zeslabení** K , která udává, kolikrát je nutno svazek primárního nebo sekundárního záření zeslabit, aby bylo dosaženo uvažovaných bezpečných hodnot ozáření (K je vždy > 1). Tato hodnota je rozdílná od hodnoty **součinitele zeslabení** k , která je uvažována ve většině zahraničních předpisů (k je reciproční hodnotou násobnosti zeslabení K a je vždy < 1).

Násobnost zeslabení K je možné vypočítat z prvních pěti hodnot vstupních údajů (pol. a) až e)) Zbývající vstupní údaje (pol. f) a g)) pak slouží k vlastnímu technickému postupu výpočtu při návrhu stínění pro konkrétní materiál.

Výpočet násobnosti zeslabení K :

$$K = \frac{W \times T \times U}{H \times L^2} \quad (6)$$

Protože hodnota násobnosti zeslabení K přesahuje mnohdy několik řádů, je výhodné při výpočtech a posuzování účinnosti stínících konstrukcí zavést pojem **logaritmická úroveň násobnosti zeslabení** N , která je dekadickým logaritmem násobnosti zeslabení K .

$$N = \log K \quad (7)$$

Např.: Hodnotu $K = 1\,000\,000$ je možno vyjádřit jako $N = 6$

Logaritmická úroveň násobnosti zeslabení N pak vlastně udává (při zjednodušeném výpočtu stínění), kolik **desetinných tloušťek** $d_{1/10}$ je třeba použít pro potřebné odstínění záření.

3.1.2 Sestavení programu STIN1

Program STIN1 sestává ze dvou částí. První část programu je vypracována pro výpočet **násobnosti zeslabení** K na základě vstupních údajů. Jednotlivé vstupní údaje jsou v programu stručně popsány a jsou pro ně uvedeny doporučující hodnoty. V případě, že hodnota násobnosti zeslabení K je již známa nebo předepsána, lze první část programu vynechat a přejít k druhé části programu, k výpočtu vlastní tloušťky stínění z exponenciální rovnice zeslabení (5). Pro jednotlivé stínící materiály jsou v programu databáze upravených konstant pro stanovení hmotnostního součinitele ze-

slabení μ_m . Až po dosazení všech vstupních hodnot je možné vypočítat vzrůstový faktor B, který u širokého svazku záření významně ovlivňuje výsledek výpočtu. Pro výpočet vzrůstového faktoru B jsem použil vzorce M. A. Capové, který jsem upravil pro použití v programu GW-BASIC. Při výpočtu konečné tloušťky stínění jsem volil iterační postup, neboť dílčí výpočet vzrůstového faktoru B vychází již z konečné tloušťky stínění, která při zahájení výpočtu není pochopitelně známa a do výpočtového vzorce se musí odhadnout pomocí vhodného algoritmu.

3.1.3 Následné programy na výpočet stínění a jejich využití v praxi

Základní program na výpočet stínění byl označen STIN1. Další jeho verze, u kterých došlo k úpravě struktury, jsem postupně označil vyššími čísly. K významné úpravě došlo u programu STIN3, který umožňuje navrhnout stínící stěnu vytvořenou z několika vrstev stínícího materiálu (sendvičové konstrukce). Právě tohoto programu bylo využito při návrhu stínění na řadě onkologických lineárních urychlovačů v České republice a na Slovensku. Jednalo se zejména o návrhy stínících konstrukcí ozařovače ve Fakultní nemocnici „U sv. Anny“ v Brně, v Masarykově onkologickém ústavu v Brně, ve Fakultní nemocnici Královské vinohrady v Praze a dále o posouzení stínících konstrukcí v nemocnicích v Žilině, Bánské Bystrici, Martině a Prešově.

Další úprava STIN4 umožňuje navrhovat a posuzovat stínění pro stěny kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem, jejichž použití jsem navrhoval v průběhu řešení grantového projektu č. 103/93/0929 „Podzemní úložiště vyhořelého paliva z jaderných elektráren“, jehož etapy „Inženýrské bariéry podzemních jaderných zařízení“ jsem byl odpovědným řešitelem.

3.2 VYMEZENÍ STÍNÍCÍCH VLASTNOSTÍ BETONU

Nejrozšířenější materiál používaný pro výstavbu stínících konstrukcí lineárních urychlovačů a ozařoven s gamazáříči o jakékoliv aktivitě je, jak jsem již vícekrát v této práci zmínil, beton, jehož základní obecně sledovanou vlastností je jeho objemová hmotnost. Problematikou návrhu betonových směsí pro stínící konstrukce jsme se začali v Ústavu radiační defektoskopie zabývat od začátku 90. let. Hodnověrným stanovením výpočtové objemové hmotnosti stínícího betonu z hlediska radiační ochrany, které může zvýšit bezpečnost a zvýhodnit celkovou ekonomickou bilanci stínící konstrukce, jsem se potom začal zabývat od poloviny 90.let.

3.2.1 Stínění z obyčejného betonu

Optimálního výsledku lze dosáhnout, je-li stínící konstrukce lineárního urychlovače projektována v dostatečném časovém předstihu před zahájením stavby a je-li v předstihu určen dodavatel betonové směsi. V tomto případě je možné předem posoudit stínící parametry vyráběného betonu, stanovit směrodatnou odchylku s objemové hmotnosti ρ a navrhnout po ekonomické stránce optimální rozměry stínící konstrukce z obyčejného betonu vyráběného v místních betonárnách.

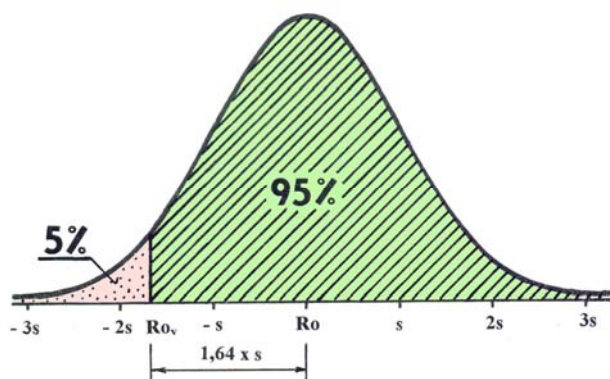
V některých případech není možno předem stanovit průměrnou objemovou hmotnost obyčejného konstrukčního betonu z místních zdrojů kameniva, takže je nutné ji pro účely výpočtu odhadnout. V tomto případě však při volbě vstupních parametrů často dochází k nepřesnostem, které mohou do značné míry znehodnotit kvalitu stínících konstrukcí, resp. zvýšit investiční náklady stavby, mají-li být požadavky na zabezpečení radiační ochrany dodrženy.

Nejčastější chybou, která se vyskytuje při výpočtu potřebné tloušťky stínění, je, jak již bylo zmíněno, že se uvažuje průměrná objemová hmotnost betonu $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ přejímaná z tabulek pro statické řešení konstrukcí, které slouží projektantům jako údaj pro stálé zatížení působící na

konstrukci. Tato hodnota se však nedá použít jako vstupní údaj pro výpočet stínění. Tvoří ji vrchol Gaussovy křivky normálního rozdělení, kterou získáme sestavením objemové hmotnosti většího počtu vzorků betonu.

Kdybychom při výpočtu tloušťky stínící konstrukce připustili průměrnou hodnotu objemové hmotnosti, připustili bychom zároveň, že v 50 % objemu stínících konstrukcí bude účinnost stínění odpovídat výpočtové hodnotě, resp. bude dokonce větší, avšak v 50 % objemu stínící účinnost konstrukce nedosáhne předepsané hodnoty, takže dávkové příkony záření za stínící konstrukcí překročí meze předpokládané výpočtem.

Při výpočtu stínění je proto vždy třeba volit racionální kompromis, aby se zabezpečila dostatečně účinná funkce stínící konstrukce bez jejího neúčelného předimenzování. Možný kompromis představuje **zaručená (výpočtová) objemová hmotnost** betonu stanovená jako hodnota, která je statisticky překročena v 95 % případů. Tato zaručená hodnota se dostane, pokud se od průměrné



Obr. 7 Výpočtová objemová hmotnost betonu (je překročena v 95 % případů)

objemové hmotnosti betonu odečte 1,64 násobek směrodatné odchylky \underline{s} (obr. 7).

Z porovnání celé řady betonáren vychází hodnota směrodatné odchylky \underline{s} pro betonovou směs $s = 20$ až 25 kg/m^3 . Zaručená objemová hmotnost proto činí u standardních betonů průměrnou objemovou hmotnost sníženou o 30 až 40 kg/m^3 .

Při návrhu betonové směsi ve vztahu k určení tloušťky stínění se přihlíží také ke zvýšenému množství záměsové vody, která způsobuje, že objemová hmotnost čerstvé betonové směsi je až o 40 kg/m^3 větší než objemová hmotnost zatvrdlého zhuštěného betonu.

Z výše uvedených úvah vyplývá, že pro výpočet tloušťky stínící konstrukce je nutno

brát v úvahu průměrnou hodnotu čerstvé betonové směsi sníženou o 70 až 80 kg/m^3 . Při průměrné objemové hmotnosti čerstvé zhuštěné betonové směsi $\rho_0 = 2350 \text{ kg/m}^3$ se proto ve výpočtu dosazuje hodnota objemové hmotnosti betonu $\rho_g = 2270$ až 2280 kg/m^3 .

3.2.2 Účelnost použití těžkého betonu

I když volba obyčejného betonu pro stavbu stínících konstrukcí je ve většině řešení dostatečná a přitom ekonomicky výhodná, nelze vyloučit, že v některých případech bude účelné volit pro stavbu vybraných jejích částí betonovou směs s větší objemovou hmotností zabezpečující větší ochrannou účinnost proti záření. Jedná se především o ty části konstrukce stínění, na které během provozu dopadá primární svazek záření, které by při zachování stejného stupně bezpečnosti byly ve vztahu k ostatním částem konstrukce nepřiměřeně rozměrné. Zvláště účelné však je těžké betony navrhovat při rekonstrukčních pracích, zejména při realizaci vestaveb, u kterých je možnost volby tloušťky stěny většinou limitována stávajícím dispozičním řešením stávajících budov.

Podstatou těžkého betonu je, že pro jeho výrobu se jako příměs používá kamenivo o vysoké specifické hmotnosti. Nejčastěji to bývá drcený baryt, mohou to však být i různé železné rudy nebo doplnkově litinová drť, popř. sekané kousky železa. Průměrná objemová hmotnost těžkého betonu závisí na koncentraci těžkých látek v kamenivu a musí být pro každé naleziště pečlivě stanovena. Dosahuje hodnot $\rho_{0t} = 3000$ až 3200 kg/m^3 .

Výpočtová objemová hmotnost ρ_{gt} pro těžký beton se stanoví obdobně jako u obyčejného betonu odečtením 30 až 40 kg/m^3 jako 1,64 násobkem směrodatné odchylky \underline{s} (za předpokladu směro-

datné odchylky shodně jako u obyčejného betonu $s = 20$ až 25 kg/m^3) od průměrné objemové hmotnosti a odečtením 40 kg/m^3 na záměsovou vodu.

Správnost výše uvedených závěrů byla opět ověřena v praxi. Zejména na výstavbě stínících konstrukcí pro dva lineární urychlovače ve Fakultní nemocnici v Hradci Králové, kde byla použita kombinace obyčejného betonu pro sekundární stínění a těžkého betonu pro primární stínění.

3.3 KONTROLA STÍNÍCÍ ÚČINNOSTI STÁVAJÍCÍCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Technický vývoj v oblasti lineárních urychlovačů směřuje k uplatňování zdrojů se stále vyššími energiemi a vyššími dávkovými příkony záření, které postupně nahrazují stávající, morálně i fyzicky zastaralé lineární urychlovače, gamazářiče aj. Většinou se nevyhneme tomu, abychom tyto nové zdroje záření umísťovali do stávajících stínících konstrukcí. Ty však musejí být vhodně rekonstruovány, aby vyhověly nejenom novým, vyšším parametrům ozařovače, ale také nově zaváděným, přísnějším bezpečnostním předpisům.

V případě, že stávající zdroj záření již nelze využít k proměření stínící konstrukce přímým způsobem (zdroj byl demontován, nebo je mimo provoz), vyvinul jsem a odzkoušel, abych vyhověl požadavkům přicházejícím z praxe na FAST VUT v Brně, radiometrickou metodu kontroly, která pro posouzení stínící účinnosti konstrukce navrhované k rekonstrukci aplikuje výsledky měření zeslabení dávkového příkonu zářiče Co60 používaného v defektoskopii. Podstata této dosud nepoužité metody spočívá v tom, že kontrolní zářič se umísťuje do otvorů vyvrtaných ve stěnách posuzované stínící konstrukce.

3.3.1 Princip radiometrické metody měření „z vývrtu“

Při posuzování stínících vlastností konstrukcí je brán jako hlavní parametr **násobnost zeslabení K** (viz kap. 3.1.1), který vyjadřuje, kolikrát kontrolovaná konstrukce zeslabuje dávkový příkon záření oproti nestíněnému zářiči. Při radiometrickém měření je násobnost zeslabení počítána podle vztahu:

$$K = \frac{\dot{D}_0}{\dot{D}} \quad (8)$$

kde K – násobnost zeslabení [1],
 \dot{D}_0 – dávkový příkon nezeslabeného svazku záření [mGy/h],
 \dot{D} – dávkový příkon zeslabeného širokého svazku záření [mGy/h].

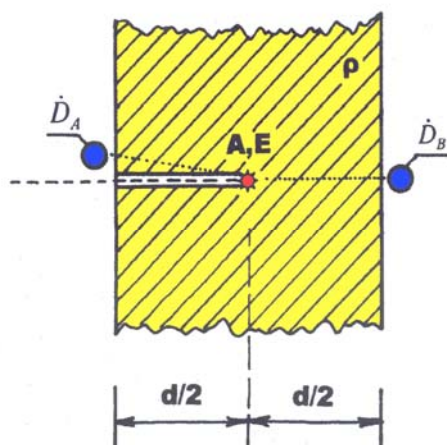
Dávkový příkon nezeslabeného svazku záření \dot{D}_0 , který vychází ze zářiče použitého při kontrole, lze vypočítat z aktivity A zářiče o energii E (zahrnuto v konstantě Γ) ve stanovené vzdálenosti l od jeho středu dle rovnice:

$$\dot{D}_0 = \frac{A \times \Gamma_{\text{Co}}}{l^2} \quad (9)$$

kde \dot{D}_0 – dávkový příkon nezeslabeného širokého svazku záření [mGy/h],
 A – aktivita zářiče [GBq],
 Γ_{Co} – konstanta gama pro kobalt [$\Gamma_{\text{Co}} = 0,347 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq}^{-1}$],
 l – vzdálenost zářič – detektor [m].

Při radiometrickém měření „z vývrtu“ je **dávkový příkon zeslabeného svazku záření \dot{D}** stanoven přímým měřením vhodným monitorem dávkového příkonu záření gama. Naměřená hodnota dávkového příkonu záření gama \dot{D} je brána jako vstupní hodnota pro další výpočet.

Při měření účinnosti stínící konstrukce je zářič umístěn do vývrtu zasahujícího přibližně do poloviny tloušťky stínící stěny (obr. 8). Monitorem dávkového příkonu je pak zjišťován dávkový příkon zeslabeného záření \dot{D}_A a \dot{D}_B na obou lících kontrolované stěny. Velkou výhodou této metody je to, že aktivita použitého zářiče může být cca 1 000× nižší než zářiče, který by musel být použit pro přímé radiometrické měření přes celou tloušťku stěny. Jako zdroje záření se tedy může využít, jak již bylo zmíněno, zářičů běžně užívaných v defektoskopii (nejčastěji Co60).



Obr. 8 Uspořádání radiometrického měření „z vývrtu“

Při vyhodnocování radiometrického měření z vývrtu je však nutno mít na zřeteli, že jednotlivé za sebou následující desetinné tloušťky stínění $d_{1/10}$ nemají stejnou hodnotu (tloušťku), jak je popsáno v kap. 3.1.

Na výpočtových modelech a experimentálně jsem proto hledal a odvodil vztah, který zohledňuje skutečnost, že při radiometrickém měření z vývrtu záření prochází 2× přes první desetinnou tloušťku, která má o cca 50 % vyšší hodnotu, zatímco při skutečném průchodu záření celou stěnou je tato první desetinná tloušťka pouze jedna. Měření, která jsem uskutečnil na vzorcích různých materiálů, prokázala, že uvedený vztah je závislý především na tloušťce stěny d a že objemová hmotnost stínícího materiálu má jen malý vliv. To umožňuje formulaci vztahu pro výpočet **modálního součinitele q** :

$$q = 5,5 \times d \quad (10)$$

kde q – modální součinitel [1],
 $5,5$ – experimentálně stanovená hodnota [m^{-1}],
 d – celková tloušťka stínění [m].

Dávkový příkon nezeslabeného svazku záření \dot{D}_0 , ze zářiče umístěného ve vývrtu, se stanovuje výpočtem pro oba líce kontrolované konstrukce (pokud je zářič přesně uprostřed stěny, stačí jen jeden výpočet). Po změření dávkového příkonu zeslabeného záření \dot{D}_A a \dot{D}_B na lících stěn se vypočtou násobnosti zeslabení K_A a K_B . Celková násobnost zeslabení stínící stěny K_T se pak získá vynásobením obou vypočtených hodnot a modálního součinitele q :

$$K_T = K_A \times K_B \times q \quad (11)$$

Po dosazení vztahu pro q dostáváme:

$$K_T = K_A \times K_B \times 5,5 \times d \quad (12)$$

Celková násobnost zeslabení K_T tedy udává, kolikrát je dávkový příkon záření Co60 zeslaben, a to ve stejné míře, jakoby procházel z jednoho zdroje celou stínící stěnou.

Na základě znalosti celkové násobnosti zeslabení K_T je pak možné stanovit úpravou exponenciální rovnice zeslabení (5) objemovou hmotnost ρ_t kontrolované stínící stěny:

$$\rho_t = \frac{\ln(K_T \times B)}{\mu_m \times d} \quad (13)$$

kde ρ_t – objemová hmotnost vypočtená z radiometrického měření [kg/m^3],
 K_T – celková násobnost zeslabení vypočtená z dílčích měření [1],
 B – vzrůstový faktor odečtený z tabulek nebo grafu pro d , E a ρ [1],
 μ_m – hmotnostní součinitel zeslabení [m^2/kg] (z tabulek pro E),
 d – skutečná tloušťka stínící stěny [m].

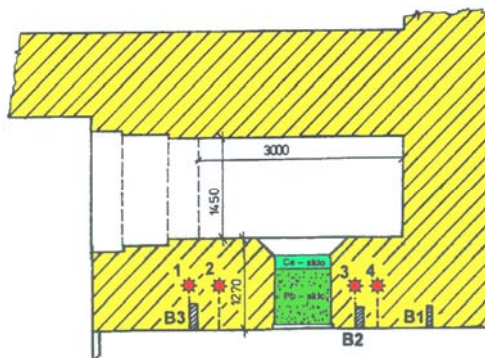
Zjištěnou objemovou hmotnost stínící stěny ρ_t je pak možné použít jako vstupní údaj při přepočtu stínících stěn pro jiné energie záření, nebo pro stanovení tloušťek dodatečně zhotovovaných stínících konstrukcí.

3.3.2 Praktické ověření radiometrického měření objemové hmotnosti „z vývrtnu“

Správnost nově vyvinuté metody radiometrického měření objemové hmotnosti stínících konstrukcí „z vývrtnu“ byla ověřena v rámci uskutečněné rekonstrukce horké komory na úložišti radioaktivního odpadu v dole RICHARD u Litoměřic (Horká komora je pracoviště, na kterém se pomocí mechanických manipulátorů pracuje dálkově se zářiči o velké aktivitě).

Horká komora (obr. 9) je umístěna v provozní budově úložiště. Tloušťka stínící stěny mezi komorou a manipulovnou je 1,27 m. Do této stínící stěny směrem z manipulovny byly zhotoveny 4 vývrty dosahující do středu tloušťky stěny. Do vývrtnů byl postupně umisťován testovací zářič $\text{Co}60$ o aktivitě $A = 0,29 \text{ TBq}$. Z obou líců stěn pak byl registrován dávkový příkon záření gama \dot{D}_A a \dot{D}_B . Následný výpočet probíhal dle odvozených vzorců (8) až (13).

Radiometrické měření prokázalo, že stínící stěny horké komory zeslabují záření od kobaltu $\text{Co}60$ více než osmmilionkrát. Teoretická hodnota objemové hmotnosti dle odvozené rovnice vychází $\rho = 2632,13 \text{ kg/m}^3$. Tato hodnota odpovídá objemové hmotnosti barytového betonu a byla prokázána také odběrem kontrolním odběrem jádrových vývrtnů.



Obr. 9 Půdorys „horké komory“ s vyznačenými „vývrty“

3.4 OPTIMALIZACE SYSTÉMŮ STAVEBNÍ OCHRANY PROTI ÚČINKŮM IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ LINEÁRNÍCH URYCHLOVAČŮ

Výsledky práce při výzkumu metodiky dimenzování stínění (kap. 3.1) a zásad určování stínících vlastností betonu (kap. 3.2) a při vyvíjení metod hodnocení funkční spolehlivosti stávajících stínících konstrukcí (kap. 3.3) se mi staly podnětem k hodnocení vyvinutých metod výzkumu a vypracování optimalizačních programů na navrhování stínění určeného v první řadě pro ozařovny s vestavěnými lineárními urychlovači. V roce 1999 jsem proto vypracoval s podporou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost souhrnnou studii s názvem „Optimalizace stavebních ochranných zdrojů ionizujícího záření“, ve které jsem tyto získané zkušenosti uplatnil. V habilitační práci uvádím

z této studie část „optimalizace stínění lineárních urychlovačů“, kterou jsem upravil podle novel Atomového zákona a navazujících vyhlášek k roku 2004.

Optimalizace stínění zdrojů s ionizujícím zářením je dnes předpisována Atomovým zákonem (§ 4 odst. 4), který je specifikovaný prováděcími vyhláškami č. 184/97 Sb. o požadavcích na zajištění radiační ochrany (do roku 2000) a vyhl. č. 307/02 Sb. o radiační ochraně (od roku 2002), jehož smyslem je dosažení nejnižší možné **kolektivní efektivní dávky záření S** u skupiny lidí, kteří zdroj záření užívají nebo ho obsluhují (radiační pracovníci) tak, aby u žádného ze sledované skupiny nebyly překročeny povolené limity a aby toto snížení bylo ekonomicky zdůvodnitelné.

3.4.1 Zásady a principy optimalizace stínění

Pro optimalizaci stínících konstrukcí jsem použil metodu **analýzy nákladů a přínosů opatření**, která vychází z předpokladu, že všechna používaná kritéria lze vyjádřit peněžní hodnotou a že užítky jsou lineárně nebo jinak definovanou funkcí vázány na peněžní kritéria. Vázení různých kritérií v analýze nákladů a přínosů opatření je peněžní hodnota jednotky charakterizující toto kritérium.

Základní představa při aplikaci postupů porovnávání nákladů a přínosů opatření a následného rozhodování je jednoduchá: vybere se ta varianta, u které je výsledný čistý přínos nejvyšší. Čistý přínos lze tedy vyjádřit vztahem:

$$B=V-(P+X+Y), \quad (14)$$

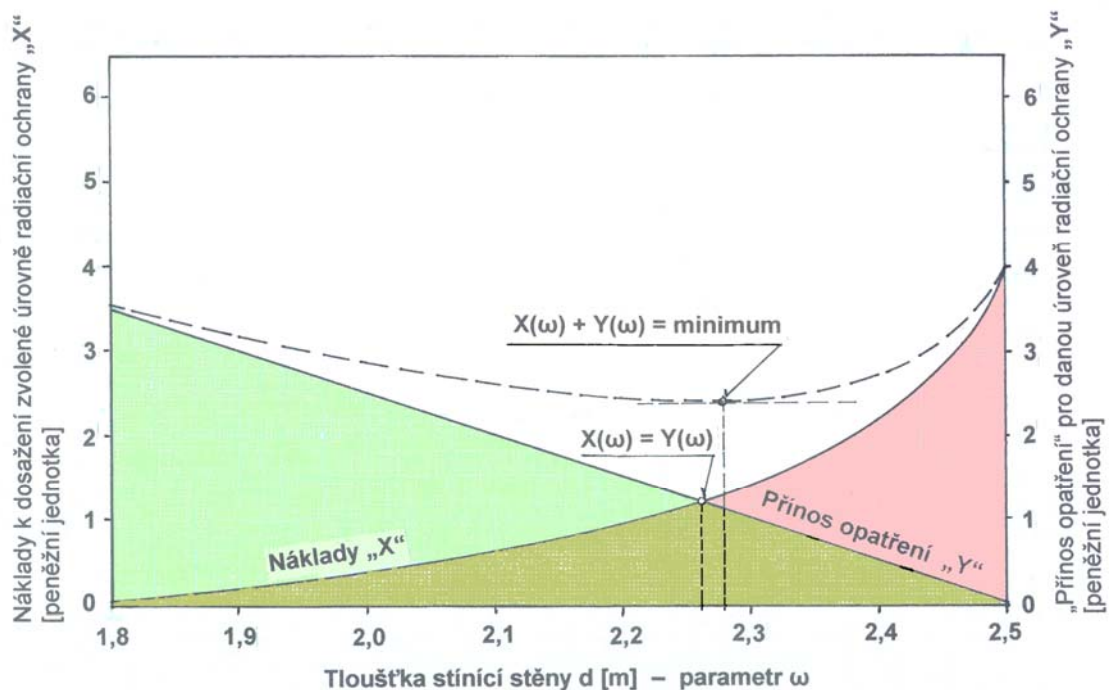
kde B – je čistý zisk vyplývající z realizace stavby,
V – je hrubý přínos stavby, výrobku nebo činnosti využívající zdroj záření,
P – jsou veškeré základní výrobní náklady s výjimkou nákladů na radiační ochranu,
X – jsou náklady k dosažení zvolené úrovně radiační ochrany a
Y – jsou náklady spojené s náhradou újmy pro danou úroveň radiační ochrany (přínos opatření).

Vyhledávání hodnoty, která splňuje optimalizační požadavky, vyžaduje srovnání souhrnu nákladů na ochranu a nákladů na nahrazení újmy. V předpisu ICRP č. 37 (International Commission on Radiological Protection) je doporučen postup, při kterém se hledá nejnižší hodnota součtu funkcí úrovně ochrany:

$$X(\omega) + Y(\omega) = \min. \quad (15)$$

kde náklady na ochranu X a náklady na vyrovnání újmy ze záření Y jsou funkcemi úrovně ochrany prezentované symbolem ω (například tloušťkou stínění, rychlostí ventilace, alternativními variantami ochranných zařízení atd.) (obr. 10).

Na rozdíl od tohoto předpisu připouští vyhláška č. 307/2002 Sb. v § 17 odst. 3 ve stati o optimalizaci radiační ochrany, že „...rozumně dosažitelná úroveň radiační ochrany se považuje za prokázanou a opatření nemusí být provedeno, pokud by náklady na ně byly vyšší než přínos opatření ...“. Z této definice se dá odvodit, že ve vyhlášce se hledá průsečík funkcí, tzn. hodnotu, kdy $X(\omega) = Y(\omega)$.



Obr. 10 Optimalizace tloušťky stínící stěny – buď pro minimální hodnotu součtu $X(\omega)+Y(\omega)$, anebo pro $X(\omega) = Y(\omega)$

Vyčíslení nákladů na ochranu lze provést použitím konvenčních jednoduchých postupů jejich ocenění. Je však nutné poznamenat, že teoreticky k hrubým nákladům na ochranu se připočítávají speciální náklady reprezentující hodnotu přiřazenou poškození vztahujícímu se k zavedení ochranné metody. Snížení úrovně expozice vyžaduje zlepšená opatření radiační ochrany včetně materiálů, energie, pracovní síly a jiných prostředků potřebných pro jejich realizaci. Toto speciální množství úsilí obvykle obsahuje přidružené poškození nikoliv nezbytně radiologického charakteru, jako výsledek řetězce aktivit vedoucích ke zvýšení radiační ochrany; například při výrobě nezbytných surovin a energie, výrobě komponent systému radiační ochrany, instalace systému apod.

Optimalizační studie může zahrnovat vyjádření radiační újmy v jednotkách nákladů. V některých situacích je ale vhodné použít raději skutečné náklady a příjmy nazývané „přínos opatření“, než jejich osobní ocenění, a protože zdravotní újma i přínos opatření jsou úměrné kolektivní efektivní dávce S , je vhodné předpokládat, že náklady na zdravotní zisk a také újma (přínos opatření) Y jsou rovněž úměrné kolektivní efektivní dávce S :

$$Y = \alpha \times S \quad (16)$$

kde Y – přínos opatření [mil. Kč],
 α – je součinitel přínosu opatření – konstanta vyjadřující náklady přiřazené jednotkové kolektivní efektivní dávce S pro účely radiační ochrany (dříve vyhl. č. 184/97 Sb., § 7, odst. 4, nyní vyhl. č. 307/02 o radiační ochraně, § 17) [mil. Kč/Sv],
 S – je kolektivní efektivní dávka, která je v § 3 platné vyhlášky definována jako součet efektivních dávek všech jednotlivců v určité skupině [Sv].

Postupy optimalizace musí probíhat vždy **v rozmezí limitujících podmínek**. Jedno z těchto omezení pramení z požadavku zachování všech individuálních dávek pod jejich odpovídajícími limity. Další omezení mohou být způsobena technickými podmínkami, které jsou specifické pro danou situaci nebo vlivem omezené dostupnosti zdrojů.

Výsledkem optimalizačního postupu při návrhu stínících konstrukcí je pak stanovení maximální povolené dávky vně stínící konstrukce, která se jako hodnota H dosadí do vzorce (6) pro výpočet násobnosti zeslabení K pro danou stínící konstrukci (kap. 3.1).

3.4.2 Zadání vstupních hodnot

a) Pro stanovení přínosu opatření „Y“ je nutné znát jednak součinitel přínosu opatření „ α “, který je pro různé hodnoty překročení směrné hodnoty až do výše limitu uveden ve vyhl. č. 307/02 Sb., § 17 odst. 3, a dále kolektivní efektivní dávku S , která je dána vztahem:

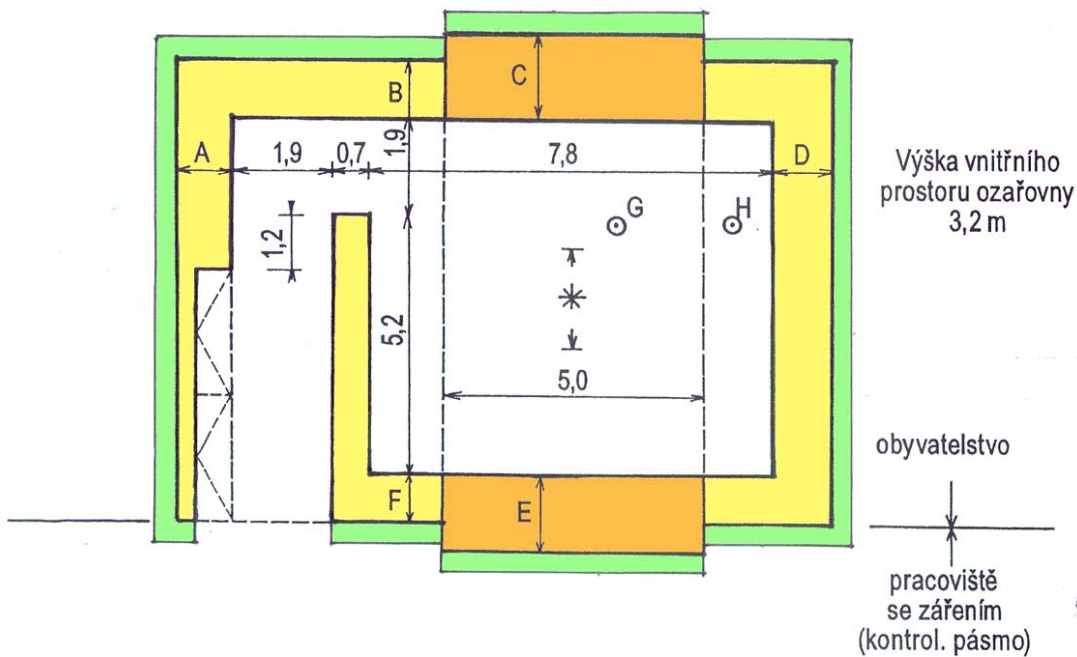
$$S = \int_0^{\infty} E \times \frac{dN}{dE} \times dE \quad (17)$$

kde dN/dE – je spektrum populace ve smyslu efektivní dávky způsobené zdrojem,
 $(dN/dE) \times dE$ – je počet jednotlivců, kteří obdrželi efektivní dávku v rozsahu E až $E + dE$ ze zdroje.

b) Ocenění nákladů na dosažení zvolené radiační úrovně „X“ je závislé jednak na ceně stavebního materiálu, jednak na životnosti stavby. Stavebním materiálem stínících konstrukcí je nejčastěji obyčejný beton, jehož cena je dána v příslušných tabulkách stavebních prací. Životnost je obecně definována jako schopnost objektu plnit požadované funkce do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předpokládané údržby a oprav. Mezním stavem se přitom rozumí stav objektu, za kterého musí být další využívání objektu přerušeno pro neodstranitelné porušení bezpečnostních požadavků, neodstranitelné překročení přípustných mezí vybraných parametrů, neodstranitelné snížení efektivnosti provozu pod přípustnou hodnotu nebo nutnost provedení generální opravy. Z tohoto hlediska se dnes životnost stínících konstrukcí odhaduje **na 30 let**.

3.4.3 Sestavení programu pro výpočet objemu optimalizovaných stínících konstrukcí lineárního urychlovače

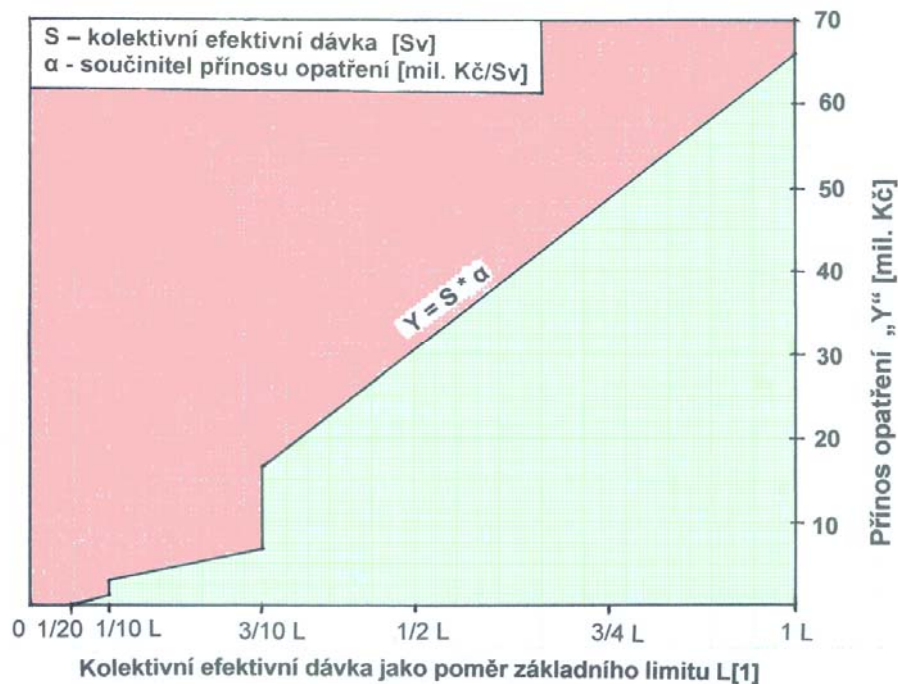
Lineární urychlovače jsou konstruovány pro energie brzděného záření v rozsahu od 5 do 25 MeV. Je přirozené, že se vzrůstající energii brzděného záření urychlovače roste i hodnota tloušťky stínících konstrukcí jak proti primárnímu svazku záření, tak proti sekundárnímu záření. Přitom technologický prostor nutný pro zajištění chodu urychlovače bývá v celém rozsahu energií přibližně shodný, takže je možné vytvořit modelový návrh ozařovny, u které se v závislosti od plánované energie brzděného záření bude měnit tloušťka stěn a stropu pro ochranu jak proti primárnímu, tak proti sekundárnímu záření. Tloušťka stínících stěn je vypočtena programem STIN1 ze vstupních údajů (kap. 3.1). Přitom program umožňuje modelovat v bezprostředním okolí urychlovače různé podmínky pro pobyt jednotlivců z obyvatelstva a přisuzovat jim různé povolené dávky záření. Modelové půdorysné schéma ozařovače, které jsem navrhl, je na obr. 11. Prostor pro technologii lineárního urychlovače je konstantní o rozměrech 7,8 m \times 5,2 m a změna tloušťek stínících konstrukcí probíhá pouze směrem k vnějšímu líci a bude se měnit pro různé energie záření urychlovače a různé povolené „limity“ vně urychlovače. Pro takto uvažované geometrické a výpočetní schéma jsem sestavil program pro PC nazvaný OPT1, který z měnících se vstupních údajů vypočítává **celkový objem stínících konstrukcí** a umožňuje **stanovit i cenu** stínící konstrukce lineárního urychlovače, a to odděleně jak pro primární stínění (z těžkého betonu), tak pro sekundární stínění (z obyčejného betonu). Tento program byl sice sestaven jako pomocný pro výpočet stínící konstrukce lineárního urychlovače, avšak dá se v praxi použít při orientačním návrhu rozměrů a kubatur všech stínících konstrukcí.



Obr. 11 Modelové půdorysné schéma stínící konstrukce lineárního urychlovače s vyznačením směru růstu tloušťky stínění pro zvyšující se energii (zeleně)
(C,E,G – tloušťka primárního stínění, A, B, D, F, H – tloušťka sekundárního stínění)

3.4.4 Stanovení „optimální tloušťky“ stínící konstrukce

Stavba stínících konstrukcí ozařovače vyžaduje vždy značné finanční náklady, jejichž výše přitom vzrůstá se stále se zvyšujícími požadavky na radiální bezpečnost vně ozařoven. V další části práce jsem stanovil takové výchozí podmínky, které by se na základě zkušeností mohly při návrhu



Obr. 12 Nárůst přínosu opatření „Y“ pro zvyšující se kolektivní dávku S, uvažovanou na dobu životnosti stínění lineárního urychlovače – 30 let

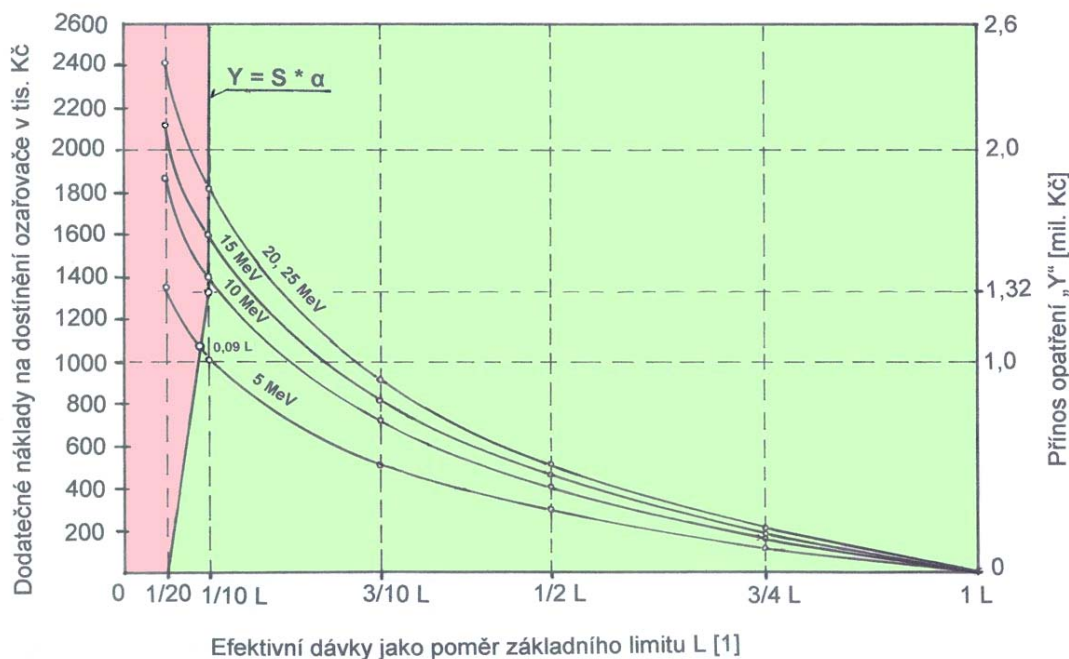
stínící konstrukce lineárního urychlovače vyskytovat a na základě výpočtu a sestrojeného grafu jsem stanovil optimální hodnotu efektivní dávky, pro kterou je nutno stínící konstrukci lineárního urychlovače dimenzovat.

Vlastní optimalizace tloušťky stínící konstrukce však probíhá v poměrně úzkém intervalu. Pohybuje se mezi zdůvodnitelným minimem a maximem, mezi kterými pak probíhá optimalizace.

- a) **Minimální tloušťka stínění** konstrukce vychází při dimenzování stěn z **obecných limitů** pro kritickou skupinu obyvatel a limitů pro radiační pracovníky. Menší tloušťku stínění ozařovny **nelze z hlediska radiační ochrany připustit**.
- b) **Maximální tloušťka stínění** konstrukce vychází při dimenzování stěn ze **směrné hodnoty** ozáření stanovené jak pro radiační pracovníky, tak pro jednotlivce z obyvatelstva. Další zvětšení tloušťky stínění by bylo **ekonomicky neodůvodnitelné**.

Pro výpočet musela být navržena modelová hodnota kolektivní efektivní dávky S za sledované období životnosti ozařovače 30 let vztažená k optimalizačnímu intervalu od **směrné hodnoty** ($1/20 L$) po **limit** (L). Nárůst přínosu opatření „Y“ pro zvyšující se kolektivní efektivní dávku S je názorně vyjádřen grafem na obr. 12.

Nárůst objemu stínící konstrukce (vypočtený programem OPT1) v optimalizačním intervalu (od směrné hodnoty po limit) dosahuje sice až 50 %, avšak vzhledem k relativně nízké ceně betonu a vysoko nastavené hodnotě přínosu opatření „Y“ vychází „optimální tloušťka“ stínící konstrukce pro velikost kolektivní efektivní dávky S za stínící stěnou rovné hodnotě $1/10$ limitu. Průběh nárůstu opatření „Y“ a poklesu nákladů za dodatečné dostínění ozařoven „X“ pro různé energie záření lineárního urychlovače je znázorněn graficky na obr. 13.



Obr. 13 Protnutí křivek nákladů na dodatečné dostínění ozařovače „X“ a přímky přínosu opatření „Y“ – stanovení optimální efektivní dávky pro výpočet stínění

3.4 ROZŠÍŘENÝ VÝZKUM V OBLASTI STÍNĚNÍ PROTI ÚNIKU IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

3.5.1 Přírodní a umělá radioaktivita

Zdroje záření, kterým je lidstvo vystaveno, se dají obecně dělit na zdroje přírodní a umělé. Z přírodních zdrojů má největší podíl na ozařování lidské populace radon a produkty jeho rozpadu. Činí přibližně 58 % celkového přírodního ozáření. Z dalších zdrojů přičiňuje k ozáření lidské populace záření ze země – terestrické, které činí 10,6 % celkového ozáření, a kosmické záření o poněkud nižší hodnotě 9 %. Vnitřní ozáření způsobené převážně radioaktivním draslíkem K40 činí 5,4 %. Zátěž ozáření z přírodních zdrojů včetně radonu tedy činí 83 % stavu celkové zátěže obyvatelstva. Na ochranu proti ionizujícímu záření z přírodních zdrojů (kromě radonu) se nepřijímají ochranná opatření, protože toto záření provází lidstvo po celou dobu jeho vývoje. Pro dnešní život nepostradatelná jsou však opatření navrhovaná na ochranu proti záření emitovanému ze zdrojů umělých.

Umělé zdroje záření, tj. zdroje vycházející z lidské činnosti, se začaly vyrábět a využívat až v průběhu 20. století. Převažující část z nich tvoří přístroje na ozařování používané v lékařské praxi pro diagnostické a terapeutické účely. Jimi emitované ionizující záření představuje 16 % ozáření. Zbývající 1 % má původ ve spadech, kterými byl zamořen zemský povrch v průběhu zkoušek jaderných zbraní (0,16 %), dále výpusti radionuklidů z jaderných elektráren (0,2 %) a nakonec provoz předmětů denní spotřeby a průmyslu (televizory, monitory PC, požární hlásiče, defektoskopie aj.).

Z uvedených hodnot procentního zatížení našeho prostředí ionizujícím zářením vycházejícím z jeho různých zdrojů je zřejmé, že pro ochranu našeho prostředí je nutné věnovat i nadále největší úsilí především na odstínění zdrojů používaných v lékařské praxi, a to speciálními stínícími konstrukcemi, anebo aspoň stavebními úpravami stávajících objektů, v nichž jsou zdroje záření ve zdravotnických zařízeních umístěny.

3.5.2 Další zaměření výzkumu ochranných opatření

Stínění proti umělým zdrojům ionizujícího záření má snížit právě ono ozáření, které činí v průměru 16 % z celkového zatížení obyvatelstva. Výzkumem uskutečněným v Ústavu radiační defektoskopie jsem se zaměřoval na postupy výpočtu stínění z diskrétních hodnot, na volbu vhodného stínícího materiálu, na metodiku posuzování stávajících stínících konstrukcí a na optimalizaci rozměrů a uspořádání stínících konstrukcí. Zkušenosti získané při řešení uvedených problémů budou využity v průběhu dalších výzkumných prací ústavu. Pozornost bude věnována zejména těmto dvěma otázkám:

a) Využití pravděpodobnostních metod při návrhu stínících konstrukcí

Současné zkušenosti ukazují, že řada údajů, která je zadávána do programu pro výpočet stínění (např. STIN1), je uváděna s ne vždy odpovídající přesností. V některých případech je do výpočtu jako zadání vkládán dokonce (byť i zkušenostmi podložený) odhad. Na zvýšení závaznosti odpovídající hodnoty výpočtu by však měly být zadávány také vstupní údaje doplněné uvedením stupně pravděpodobné správnosti vstupních údajů. Výsledek pak bude uveden také jako hodnota s pravděpodobnostními odchylkami a právě takový výsledek by umožňoval s větší odpovědností stanovit tloušťku stínících konstrukcí přihlížející k možným změnám v zadání výpočtu. Práce založené na „pravděpodobnostním výpočtu“ stínění jsou zařazeny do výhledu činnosti ústavu.

b) Návrh ochranných opatření proti účinkům neutronového záření

V terapii onkologických onemocnění se omezeně začínají využívat neutronové zdroje, jejichž základem je kalifornium Cf 252. Problematika stínění neutronových zdrojů se zásadně liší od problematiky stínění záření gama, popř. záření lineárních urychlovačů, a to jak po stránce výpočtu, tak po stránce volby stínícího materiálu. Na zeslabení neutronového záření je např. nejúčinnější takový materiál, který obsahuje vodíková jádra (voda, parafín, polyetylén aj.). Při brždění neutronů v tomto materiálu vzniká ovšem také záření gama a to je nutno zároveň zeslabit materiálem s velkou objemovou hmotností, s využitím zásad popsaných v této práci. Stínění neutronového záření se proto musí řešit jako sendvičové, složené z více vrstev materiálu s charakteristikami odpovídajícími potřebám stínění pro oba druhy procházejícího záření.

První zkušenosti s návrhem neutronového stínění jsem získal při navrhování pracoviště brachyterapie v Masarykově onkologickém ústavu v Brně (Závěrečná zpráva, VUT 96-D-09, Hobst, L.: Předběžný návrh stínících konstrukcí rekonstruovaných pracovišť v severním křídle Masarykova onkologického ústavu v Brně na Žlutém kopci). V současnosti se objevují další požadavky na stínění zdrojů neutronového záření, a proto další výzkum bude zaměřen na vypracování programu pro PC, pomocí kterého by bylo možné vybrat pro dané zadání nejvhodnější alternativy stínících konstrukcí neutronového záření.

4 ZÁVĚR

Historie objevu a využití ionizujícího záření přesahuje jen nepatrně hranici jednoho století. Z hlediska vývoje lidské civilizace je to historie mizivá, vždyť jiné obory – např. metalurgie – se vyvíjely od vzniku lidské společnosti. Avšak přes tuto krátkou dobu, co objev radioaktivity byl pojat do povědomí širitelů technického pokroku lidstva, jako faktor tohoto pokroku, jehož poznání, tj. poznání charakteristických vlastností ionizujícího záření a využití tohoto záření se stalo podnětem dalšího vývoje nejenom v průmyslových oborech strojírenství a stavebnictví, ale zejména také v lékařství, v oboru diagnostiky a zvláště pak terapie.

V této fázi poznání radioaktivity jsem se zabýval vývojem a prohlubováním základních znalostí radiačních metod ve stavebnictví – radiografií a radioskopií. Veřejnost však začala být postupně stále naléhavěji, i když ne vždy s dostatečnou odborností, upozorňována na skryté, živé přírodě škodlivé působení ionizujícího záření, hrozivého proto, že je smysly nepostižitelné a že jeho působení na lidský organizmus vyvolává nejenom nemoc z ozáření, ale i při nižších dávkách může iniciovat vznik onkologických onemocnění. Uvědomil jsem si proto povinnost pracovišť zabývajících se využíváním ionizujícího záření v praxi věnovat více úsilí na ochraňování podmínek života v okolí jakýchkoliv zdrojů záření. Zkoumal jsem a řešil ochranu pronikání radonu z podloží do obytných staveb, zjišťoval radioaktivitu stavebnin aj. Hlavní část svého pracovního úsilí jsem však věnoval výzkumu stavebních konstrukcí a opatření zaručujících spolehlivé stínění zdrojů záření a zabezpečujících trvalou ochranu unikání záření z ozařoven do vnějšího prostředí.

Věřím, že obě zaměření mých výzkumných prací, o nichž je zde referováno, přispívají k tomu, že využívání ionizujícího záření, onoho nadějného objevu z konce XIX. století, se tím v úvodě zmíněným výrazným faktorem vývoje lidstva skutečně stává.

5 VYBRANÉ PRÁCE AUTORA

5.1 PUBLIKACE VÝSLEDKŮ Z OBLASTI RADIOGRAFIE

Hobst, L. – Hönig, A.: Betatronografie konstrukcí z normálního železového betonu. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-121-001-03-03/03, 1976.

Hobst, L.: Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-333-224-E04-02-15-3, 1977.

Hobst, L.: Zkušební, výpočtové a hodnotící postupy – Vyhodnocování radiogramů registračním fotometrem. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-333-224-04E02-16-5, 1977.

Hobst, L.: Betatronografie předpjatého betonu, Sborník konference „*Nedestruktivní zkoušení ve stavebnictví*“, 1977, Brno.

Hobst, L.: Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu, Sborník konference „*Skúšobníctvo v inžinierskom staviteľstve*“, 1978, Bratislava.

Hobst, L.: Využití betatronografie pro průzkum stavebních konstrukcí, *Inženýrské stavby* č. 5, 1981.

Hobst, L.: The Radiographic Monitoring of Reinforcing Materials in Concrete Structures. Sborník konference RILEM „*Long Term Observation of Concrete Structures*“ 1984, Budapest, Maďarsko.

Hobst, L.: Radiography of Prestressed Concrete Structures, Sborník mezinárodní konference „*In Situ Behaviour of Structures*“, 1986, Constanta, Rumunsko.

Hobst, L.: Radiografická kontrola konstrukcí z předpjatého betonu, *Inženýrské stavby* č. 10, 1986, str. 525–529.

Hobst, L.: Ověření kvality zainjektování předpínací výztuže radiografií, *Radioizotopy* č. 2–3, 1986, str. 93–96.

Hobst, L. – Hönig, A. – Janeček, B.: Complex Investigation of the Reinforced Concrete Structure of the Therapeutic Building IRMA in Piešťany Spa. Konference „*In Situ Behaviour of Buildings*“, sborník konference, 1988, Arad, RSR.

Hobst, L.: Vývojové směry v radiografii stavebních konstrukcí. Sborník konference „*Jakost a zkušebnictví ve stavebnictví*“, 1989, Brno.

Hobst, L.: Bestimmung des Verlaufes von Bewehrungen in ausgewählten Querschnitten von Stahlbetonkonstruktionen durch zerstörungsfreie Prüfmethode. Seminář na TH Leipzig, 1989, Lipsko, NDR.

Hobst, L. – Hönig, A. – Janeček, B.: Radiometrie fyzikálních a mechanických vlastností stavebních materiálů a konstrukcí. Výzkumná zpráva úkolu III-3-1/12-E04 03.1, 1990.

Hobst, L. – Höinig, A. – Valošek, P.: Radioscopy of Reinforced Concrete Panels. Sborník mezinárodní konference „*Diagnosis of Concrete Structures*“, 1991, Bratislava.

Hobst, L. – Víték, L.: Využití radiografie při diagnostice železobetonových konstrukcí. Sborník konference „*Sanace betonových konstrukcí*“, 1993, Brno.

Hobst, L.: Non Destructive Testing Used in Searching Explosive Charges. Konference *DAMSTRUC 98*, Rio de Janeiro, Brazílie, 1998, CD-ROM

Hobst, L. – Víték, L. – Anton, O.: The Application of Non-destructive Testing to Reinforced Concrete Structures for a Ferrocement Sailing Boat. Konference *DAMSTRUC 2002*, Rio de Janeiro, Brazílie, 2002, CD-ROM

5.2 PUBLIKACE VÝSLEDKŮ Z OBLASTI STAVEBNÍ OCHRANY PŘED ZÁŘENÍM

Hobst, L. – Víték, L. – Daňková, M.: Vývoj stínících vrstev pro ochranu rentgenových pracovišť. Konference „*Sanace 1994*“, Brno, sborník konference, str. 219–223.

Hobst, L. a kol. ÚRD: Soubor dílčích zpráv o řešení grantového projektu č. 103/93/0929 „Podzemní úložiště vyhořelého paliva z jaderných elektráren“ (koordinátor prof. J. Bradáč), etapa „Inženýrské bariéry podzemních jaderných zařízení“. Dílčí zpráva za období 1993–1995

Hobst, L.: Výskyt radonu v obytných budovách a technická ochrana proti radonu. Sborník celonárodní konference „*Stavebnictví městům a obcím*“, 1996, str. 29–31.

Hobst, L.: Betonáž stínících konstrukcí pro lineární urychlovače a jejich kontrola. Sborník VI. mezinárodní konference *Sanace 1996*, str. 76–81, ISSN 1211-3700.

Hobst, L.: Design and Inspection of Shielding Enclosures for Linear Accelerators. Konference „*In situ Behaviour of Constructions*“, 1996, Brasov, Rumunsko, sborník konference str. 145–151.

Hobst, L.: Beton jako stínící materiál kontejnerů pro vyhořelé jaderné palivo. Sborník příspěvků semináře „*Podzemní skladování vyhořelého jaderného paliva*“, FAST VŠB-TU Ostrava, říjen 1999, str. 88–94, ISBN 80-7078-707-4.

Hobst, L.: Optimalizace stavebních ochranných zdrojů ionizujícího záření. Závěrečná zpráva pro SÚJB Praha, 1999.

Hobst, L.: Úvod do problematiky návrhu a výroby těžkých betonů. Sborník příspěvků konference „*Speciální betony*“ (*Vlastnosti – Technologie – Aplikace*), Otrokovice, březen 2002, str. 184–191, ISBN 80-86604-00-4.

Hobst, L. – Víték, L. – Štěpánek, P.: Zvyšování účinnosti stínících konstrukcí lineárních urychlovačů. Sborník XII. mezinárodního symposia „*Sanace 2002*“, str. 45–50, ISSN 1211-3700.

Hobst, L. – Víték, L. – Štěpánek, P.: An Increase of Shielding Construction Efficiency for Linear Accelerators. Konference *DAMSTRUC 2002*, Rio de Janeiro, Brazílie, 2002, CD-ROM.

6 ABSTRACT

Radioactivity and X-rays were discovered more than one century ago, nevertheless, the discovery has affected the development of the mankind in all areas of national economy. It has strongly contributed to an improvement and development of new diagnostic and therapeutic methods in medicine as well as to the development of new methods of non-destructive testing in engineering.

The author of the habilitation thesis started with his scientific work at Brno University of Technology by improving already introduced methods of radiography and radiometric testing. Radiation sources, which were available for defectoscopy at that time, did not make possible to investigate concrete constructions with a thickness greater than 20 cm, and hence, the author of the habilitation thesis has included into his research programme the verification of capabilities and development of the methods of more intensive radiation source applications. For research, the PMB-6 betatron was used. After investigation of the apparatus characteristics and physical properties of its radiation, especially the laws of radiation attenuation during radiation penetration through the matter with different densities, the author derived the equation for radiation attenuation by means of the effective mass attenuation coefficient for the bremsstrahlung of the betatron. He also found that the radiation betatron beam has a low homogeneity, and but on the other side, the quality of betatronograms is favourably affected by the intensifying foils of different composition. He paid greater attention to the application of this effect. He also derived the exponential equation for turning black of betatronograms, and the results have been exerted in the methods of objective betatronogram evaluation.

A qualitatively higher degree of radiation defectoscopy is radioscopy which allows a direct check of building parts. Suitability of an x-ray unit-video camera system has been verified for its application in civil engineering. Its mechanical control, i.e. either manual control or a PC control, has been solved. Digitization and numerical image processing in radioscopy has its perspective. This issue has been involved into the Institute Research Plan for the years 2005 – 2010.

However, during development of the new methods of irreplaceable application of ionising radiation in engineering and health service undesired and harmful effects of ionising radiation have been demonstrated to man exposed to uncontrolled effects against which man must be protected.

The second part of the study has been therefore devoted to the effects of radiation, its potential harmful impact upon the environment against which it is necessary to develop the protective measures.

In the habilitation thesis, PC programs are briefly described which have been compiled for the calculation of shielding wall thicknesses. In this part, the author deals with the issue of applications of shielding concretes for the construction of linear accelerators. The arguments are given to support the use of plain and heavy concretes in the particular parts of the accelerator shielding constructions.

A brief description of a newly developed method of testing the properties of shielding concrete by means of the direct measurements of radiation attenuation of a defectoscopic source placed in a „bore“ is given in the separate part of this work; and the mathematical formulae for the measurement evaluation by this method are also derived and included.

The final part is devoted to the issue of the shielding process optimis v úvodě zmíněným výrazným faktorem vývoje lidstva ation pursuant to the Atomic Act. The optimization procedure is derived by means of tables and graphs, and the result is presented on an example.

In conclusion, the succeeding possible directions and perspectives of research in the field of ionising radiation applications in civil engineering are proposed.