

# Ověřování modelů proudění radioindikátory – modely kolimovaných detektorů

J. Thýn a R. Žitný

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07

Praha 6, Tel.: 420 2 2439 2559 (2550), Fax: 420 2 2431 0292,

E-mail: [thyn@fsid.cvut.cz](mailto:thyn@fsid.cvut.cz), [zitny@fsid.cvut.cz](mailto:zitny@fsid.cvut.cz)

## 1. Úvod

Vizualizace proudění prostřednictvím modelů CFD vyžaduje experimentální verifikaci, zejména v případě turbulentního či nestabilního proudění a u heterogenních systémů. Distribuční funkce dob prodlení identifikované z odezvy na výstupu umožňují verifikovat jen modely proudění relativně jednoduchých struktur [1]. V případě komplexních, např. recirkulačních nebo paralelních toků je zapotřebí použít pro jednoznačnou identifikaci modelu proudění i další informace, např. distribuce dob stáří částic, které se nacházejí uvnitř aparátu. Pro stanovení těchto distribucí jsou v průmyslových aplikacích výhodné zejména radioindikátory, umožňující měření přes stěny zařízení.

Z indikátoru (radioaktivního zdroje) do všech směrů emitované fotony reagují s hmotou prostředí a stěn zařízení přičemž mění svoji energii a směr. Scintilační sondy přiložené k vnější stěně zařízení zachycují jen část fotonů, které projdou prostředím a stěnou zařízení a které jsou usměrněny otvory ve stínícím olověném krytu do kterého jsou sondy uloženy. Vhodně zvolená geometrie stínícího krytu a vhodná kolimace, tj. vhodný kolimátor svazku zlepšuje prostorovou rozlišovací schopnost detektoru. Z analýzy detekčního řetězce vyplývá, že měřený signál neodpovídá přímo koncentraci indikátoru ve sledovaném objemu a že detekované hodnoty mohou být tímto řetězcem zkreslené koncentrace indikátoru. Hlavní problém popisu detekčního řetězce tkví ve správné presentaci možných interakcí fotonů. Účinná a relativně jednoduchá metoda hodnocení detekčního řetězce je metoda Monte Carlo [1,2]. Přesnost popisu je však zaplácena extrémně dlouhými výpočty. Pro zpracování velkých objemů dat (např. odezvy detektoru na prostorové rozložení radioindikátoru v uzlových bodech konečně prvkového modelu) se zdá výhodnější použít jednoduché a rychlé algoritmy, které zanedbávají některé typy interakcí (způsobujících např. rozptýlené záření) nebo které uvažují zjednodušené modely absorpce záření, ale u kterých se předpokládá, že dostatečně přesně popisují odezvové charakteristiky použitého detekčního systému.

Příspěvek se zabývá posouzením tří variant modelování odezvy na bodový zdroj měkkého gama zářiče (0.14 MeV) umístěném ve vodě a sledované scintilačním detektorem obklopeným olověným stíněním s různou hloubkou a průměrem válcovitého kolimačního otvoru. Dvě varianty výše uvedených algoritmů [3,4] jsou porovnávány s metodou, která pracuje s relativně rychlým algoritmem MC pomocí programu Inspect [5].

## 2. Testované algoritmy stanovení odezvy detekčního systému na bodový zdroj záření.

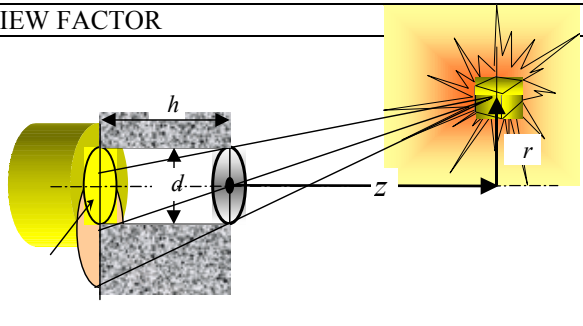
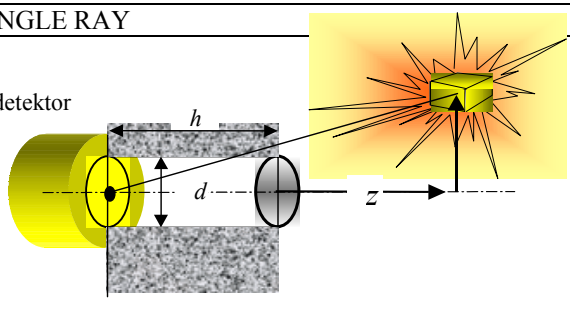
Metoda Monte Carlo byla implementována v programu INSPECT, který využívá zrychleného algoritmu, který navrhl Tola [5]. Základním principem je náhodná volba počáteční polohy, energie, směru a volné dráhy fotonu s následným výpočtem jeho nové polohy. Jestliže foton neopustí systém, dochází k jeho interakci s prostředím. Program INSPECT předpokládá čtyři hlavní typy interakcí, fotoelektrický efekt, koherentní a nekoherentní efekt a tvorbu párů. Pravděpodobnost těchto dějů je funkcí energie vyzářeného fotonu. Typy interakcí se volí náhodně a procedura se opakuje dokud foton buď neopustí systém nebo dokud foton není absorbován scintilačním

krystalem. Když se uvedeným způsobem zpracuje dostatečně velký počet vyzářených fotonů je možné statisticky určit množství detekovaných fotonů tj. počet registrovaných pulsů.

Program INSPECT simuluje odezvy pro zadaný druh detektoru, stínění a kolimace na bodový zdroj záření zadané energie, který je umístěn v definované trubce v definovaném prostředí. Autoři úspěšně ověřili způsob výpočtu porovnáním s experimenty s měkkým (0.66 MeV) i tvrdým (>1 MeV) zdrojem záření ve vzduchu a ve vodě [6].

S metodou Monte Carlo byl porovnáván algoritmus založený na objemu prostředí viděném detektorem (t.zv. view factor VF) a algoritmus jednoho paprsku (single ray SR). Tyto prosté a rychlé algoritmy, navržené pro verifikaci modelů CFD, jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1.

VIEW FACTOR	SINGLE RAY
	
<pre> Function <b>colivf</b>(z, r, d, h, amu)   Parameter (pi=3.141)   Real l, lh, lh2   c z-distance from collimator   c r-radial coordinate of source   c d-aperture   c h-thickness of collimator   c amu-attenuation (=rho * mu)   r1=d/2   r2=r1*(h+z)/z   r12=r1*r1   r22=r2*r2   e=h*r/z   l=sqrt(z**2+r**2)   zh=z+h   lh2=zh**2+r**2   lh=sqrt(lh2)   if (e.ge.r1+r2) then     s=0   elseif (e.le.r2-r1) then     s=pi*r12   elseif (e.ge.sqrt(r22-r12)) then     b=sqrt(4*r12*r22-(e**2-r12-r22)**2)/2     ber1=b/(e*r1)     ber2=b/(e*r2)     s=r12*asin(ber1)+r22*asin(ber2)-b   else     b=sqrt(4*r12*r22-(e**2-r12-r22)**2)/2     ber1=b/(e*r1)     ber2=b/(e*r2)     s=r12*(pi-asin(ber1))+r22*asin(ber2)-b   endif   colivf=s*zh*exp(-amu*l)/(2*pi*r12)*   (1./lh-1./sqrt(lh2+r12)) end </pre>	<pre> function <b>colisr</b>(z, r, d, h, amu, acol)   parameter (pi=3.141)   real lh, lh2   c   c z-normal distance of source from collimator   c r-radius   c d-aperture   c h-thickness of collimator   c amu-attenuation of media   c acol-attenuation of collimator   c   r1=d/2   r12=r1**2   e=h*r/z   zh=z+h   lh2=zh**2+r**2   lh=sqrt(lh2)   rlm=sqrt((r-r*h/zh)**2+(h-zh)**2)   if (r/zh.le.r1/h) then     rlc=0   else     rlc=sqrt((r1-r*h/zh)**2+(h-zh*r1/r)**2)   endif   colisr=zh*exp(-amu*rlm-acol*rlc)/   (2*pi*r12)*(1./lh-1./sqrt(lh2+r12)) end </pre>

Výsledné vztahy jsou v obou případech velmi jednoduché, např. u metody VF (View Factor) je normovaný signál detektoru  $N$  aproximován vztahem

$$N = \frac{S \cos \psi}{4\pi l_d^2} e^{-al_m} = \frac{S z_d}{4\pi l_d^3} e^{-al_m}, \quad (1)$$

kde  $S$  je ozářená plocha detektoru,  $\psi$  je úhel mezi osou detektoru a paprskem záření mířícím do středu detektoru.  $l_d$  je délka tohoto paprsku (tj. od bodového zdroje až k detektoru), zatímco  $l_m$  je délka téhož paprsku, ale jen v oblasti, kde dochází k absorpci záření v mediu. Ozářená plocha detektoru  $S$  je rovna ploše detektoru, pokud zdroj záření není vzdálen od osy detektoru o více než  $d/2$ , v opačném případě je detektor částečně zacloněn kolimátorem a ozářená plocha se musí počítat dle výše uvedeného algoritmu, viz též [3, 4]. Algoritmus VF předpokládá, že materiál kolimátoru představuje dokonalé stínění, tj. že zdroj záření, jehož vzdálenost od osy je větší než

$$r > d\left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right) \quad (2)$$

je pro detektor neviditelný (tomu odpovídá podmínka [e.ge.r1+r2] ve výše uvedeném programu).

Dle vztahu (1) by však při přiblížení zdroje záření těsně k čelu detektoru rostla jeho odezva do nekonečna, což neodpovídá skutečnosti. Ilustrujme tento případ na příkladu detektoru (s poloměrem  $R$ ) bez kolimátoru a s bodovým zdrojem záření v místě  $(r_d, z_d)$ . Signál detektoru je v tom případě úměrný následujícímu integrálu přes celou plochu detektoru

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{z_d r dr d\varphi}{4\pi l^3} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{z_d r dr d\varphi}{4\pi(z_d^2 + r_d^2 + r^2 - 2rr_d \cos\varphi)^{3/2}} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{z_d r dr d\varphi}{4\pi(l_d^2 + r^2 - 2rr_d \cos\varphi)^{3/2}} \quad (3)$$

Omezíme-li se na případ, že zdroj záření je v ose detektoru ( $r_d=0$ ), integrál (3) se zjednoduší.

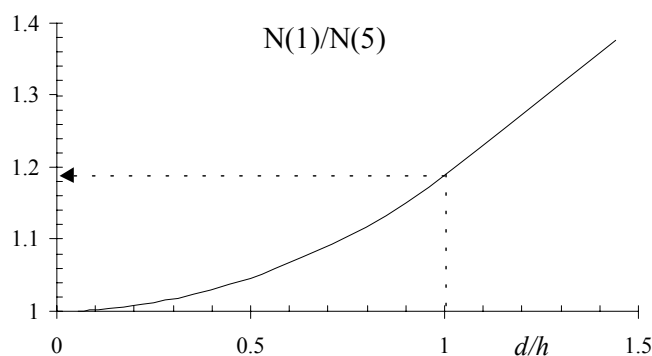
$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{z_d r dr d\varphi}{4\pi(l_d^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{z_d}{2} \left( \frac{1}{l_d} - \frac{1}{\sqrt{l_d^2 + R^2}} \right) = \frac{Sz_d}{2\pi R^2} \left( \frac{1}{l_d} - \frac{1}{\sqrt{l_d^2 + R^2}} \right) \xrightarrow{R \ll l_d} \frac{Sz_d}{4\pi l_d^3} \quad (4)$$

Porovnáním původního vztahu (1) a (4) plyne, že vhodnější asymptotické vlastnosti pro  $l_d \rightarrow 0$  obdržíme modifikací vztahu (1)

$$N = \frac{Sz_d}{2\pi R^2} \left( \frac{1}{l_d} - \frac{1}{\sqrt{l_d^2 + R^2}} \right) e^{-a l_m} \quad (5)$$

což odpovídá příkazu `colivf=s*zh*exp(-amu*1)/(2*pi*r12)*(1/lh-1/sqrt(lh2+r12))` použitím na závěr procedury COLIVF i COLISR.

Modifikace algoritmů na "krátké vzdálenosti"(5) je vždy lepší než původní varianta (1). Rozdíl predikce mezi algoritmy založenými na vztahu (1) a na jeho modifikaci (5) znázorňuje Obr.1. Na něm je vynesena poměr odezvy detektorů na bodový zdroj záření umístěný přímo na stěně kolimátoru, tj. pro  $z_d=l_d=h$ , počítaných dle (1) a (5) v závislosti na poměru  $d/h$ .

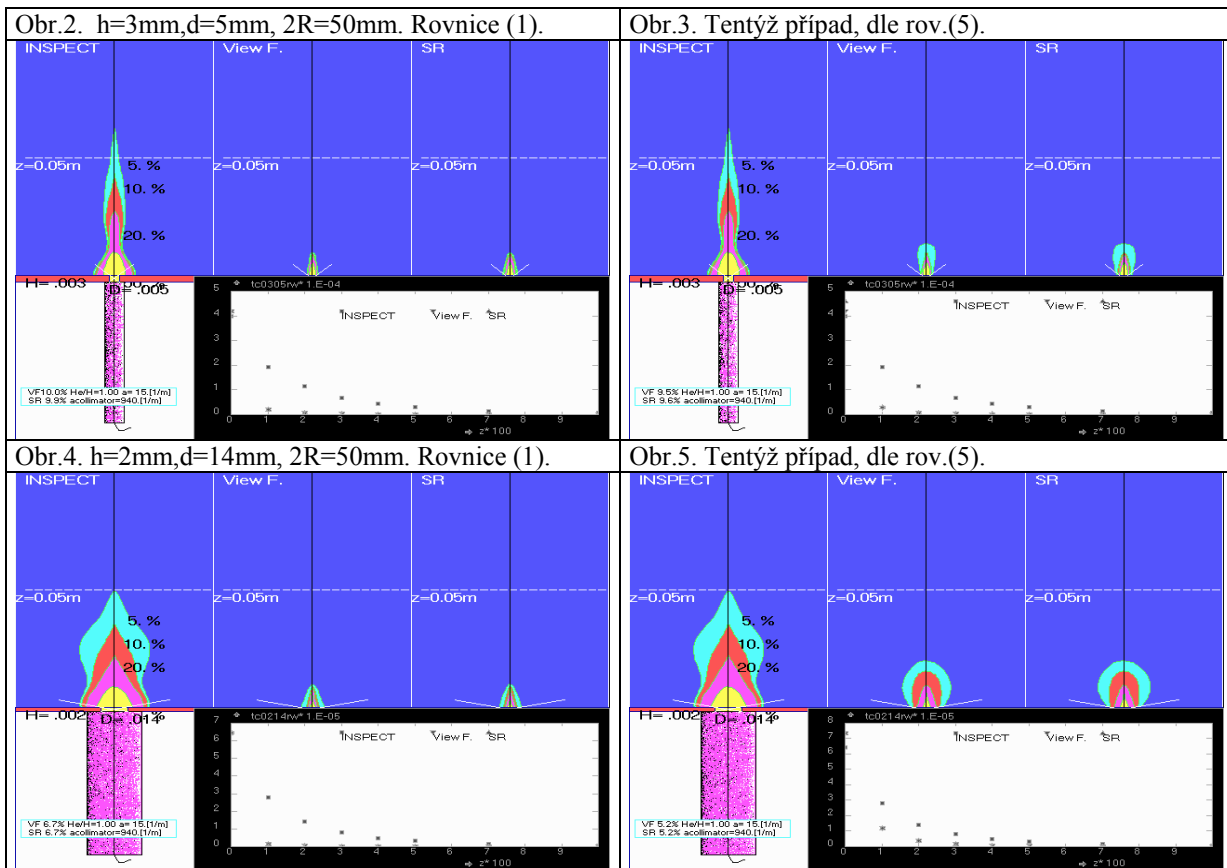


Obr.1 Poměr odezvy detektoru počítaných dle (1) a (5) v závislosti na  $d/h$ .

Z grafu (1) plyne, že např. při poměru  $d/h=1$  nemůže být odchylka větší než 20% (odchylka pochopitelně klesá s rostoucí vzdáleností zdroje záření od detektoru).

### 3. Jak daleko kolimovaný detektor vidí?

Základní charakteristiky kolimovaného detektoru jsou zorný úhel a vzdálenost vidění, která souvisí s rychlostí klesání signálu detektoru při vzdalování zdroje záření. Predikce délky vidění metodami MC, VF a SR se v některých případech, zejména u tenkého stínění a malých kolimačních otvorů, velmi výrazně liší. Tyto rozdíly ilustrují následující obrázky 2 až 5, na nichž jsou znázorněny izočáry hodnot odezvy detektoru, odpovídajících určitým polohám bodového zdroje záření. Modelový případ se týkal měkkého gama zářiče Tc99 (140keV) o aktivitě 1 mCi (tj. 37 MBq), umístěného v rozlehlé nádobě zaplněné vodou (lineární součinitel absorpce 15 [1/m]) s olověným stíněním detektoru (součinitel absorpce 941 [1/m]).

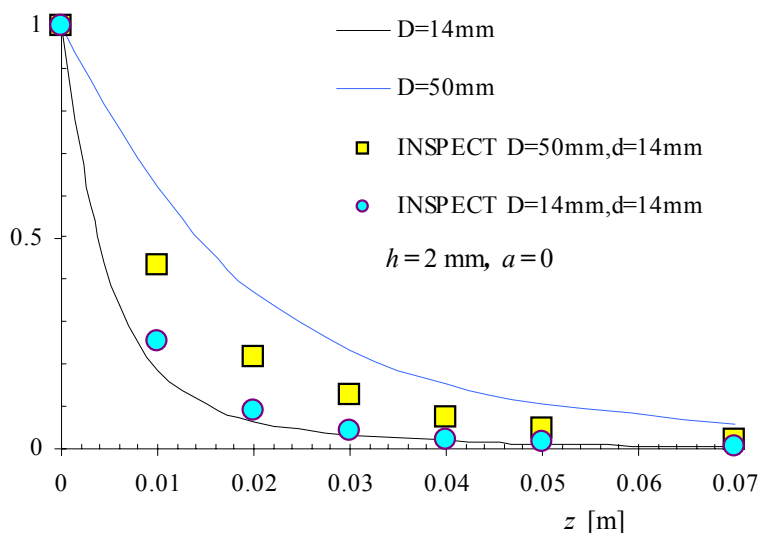


Odlíšné chování algoritmů VF i SR, předpovídajících mnohem kratší dosah vidění než metoda MC, lze snad vysvětlit tím, že průměr detektoru  $2R$  (cca 50 mm) byl v uvedených případech výrazně vyšší než otvor kolimátoru  $d$  (5, resp. 14 mm). Oba algoritmy VF i SR totiž předpokládají, že krystal detektoru má stejný průměr jako kolimační otvor, a neberou v úvahu fakt, že když je vrstva kolimátoru  $h$  velmi tenká (zde 2, resp. 3 mm), může detektor registrovat záření na ploše, která je podstatně větší než průměr otvoru kolimátoru. Místo algoritmu SR (1 paprsek) byla proto navržena modifikace 3R (3 paprsky), uvažující i paprsky směřujícími mimo otvor kolimátoru. Předběžné výsledky vyvolávají pochybnosti o správnosti předchozí pracovní hypotézy, neboť ani 3R algoritmus nedokázal výrazně prodloužit dosah vidění detektoru, viz. příloha.

Velmi malý dosah vidění predikovaný algoritmy VF a SR vyplývá ze vztahu (5), který se pro  $r=0$  (to jest pro bodové zdroje záření ležící v ose detektoru) redukuje na

$$N(r = 0) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 / (h + z)^2}} \right) e^{-az} \quad (6)$$

Tento vztah je znázorněn na Obr.6 pro průměr a tloušťku kolimátoru zhruba odpovídající Obr.5. Z grafu je patrné, že i když zanedbáme absorpci záření v mediu ( $a=0$ ), klesne odezva (6) už ve vzdálenosti 1 cm od kolimátoru zhruba pětkrát pro malý průměr detektoru 14 mm. Průměru detektoru 50 mm ale odpovídá pokles jen asi o 40%, a to koresponduje s výše uvedeným případem, modelovaným metodou Monte Carlo<sup>1</sup>. Simulace provedené programem INSPECT vskutku prokazují, že když se zmenšil průměr detektoru  $D$ , zkrátí se dosah vidění zhruba dvakrát (při stále stejném průměru otvoru kolimátoru  $d$ ), viz obr.6. Takto získané výsledky pak poměrně dobře souhlasí s metodami VF i SR na obr.5.



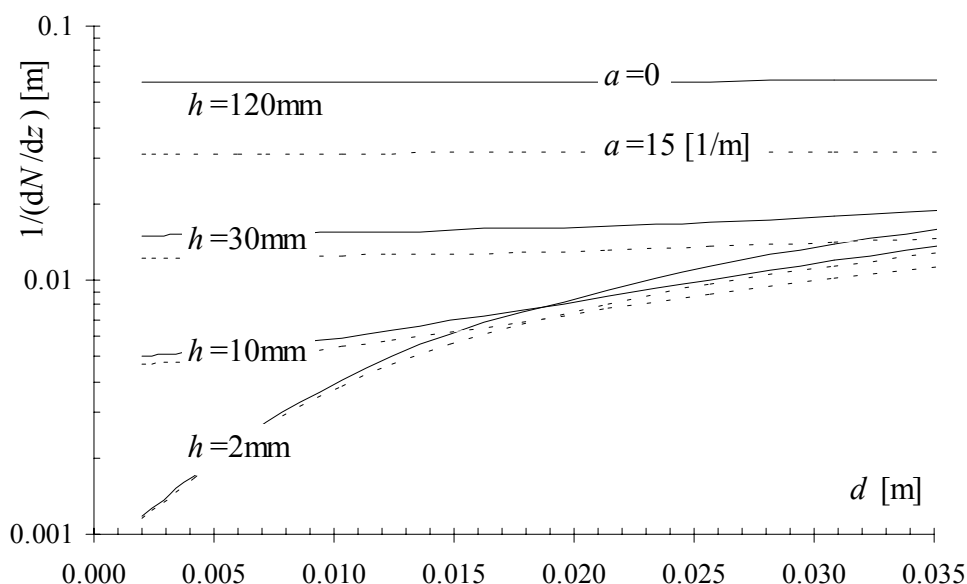
Obr.6 Pokles počtu detekovaných pulsů (odezvy detektoru) s rostoucí vzdáleností zdroje záření od roviny kolimátoru. Spojité čáry odpovídají vztahu (6) pro neabsorbující medium. Pro srovnání jsou uvedeny hodnoty, počítané programem INSPECT pro stejný průměr kolimátoru (14 mm), ale různý průměr detektoru (50 resp. 14 mm).

Na základě uvedených výsledků se zdá, že je možné (s jistou dávkou opatrnosti) odhadovat vzdálenost vidění i jednoduchými metodami VF nebo SR. Vzdálenost vidění můžeme např. charakterizovat rychlostí útlumu normalizovaného signálu na stěně kolimátoru (tj. pro  $z=0$ ). Tuto počáteční rychlost útlumu lze odvodit ze vztahu (6)

$$\left. \frac{dN^*}{dz} \right|_{z=0} = \frac{1}{N} \left. \frac{dN}{dz} \right|_{z=0} = - \frac{R^2}{h^3 \left(1 + \frac{R^2}{h^2}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{h^2}} - 1\right)} - a \quad (7)$$

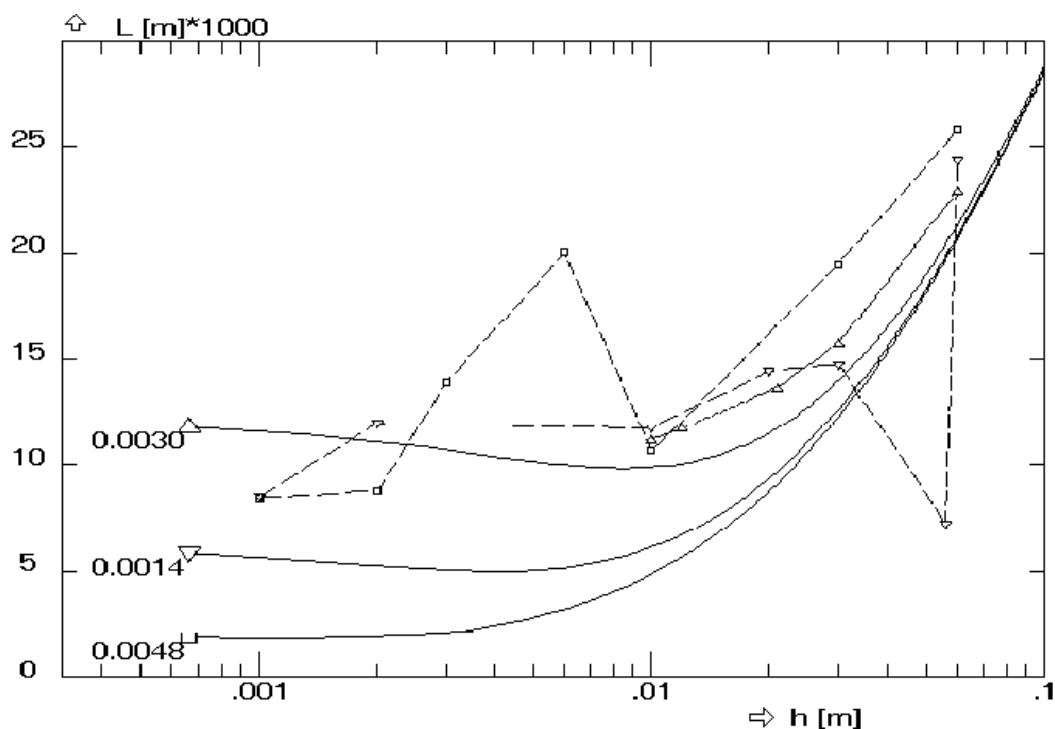
Vztah (7) je znázorněn na Obr.7 z něhož vyplývá, že s rostoucím průměrem kolimačního otvoru dálka vidění roste (při konstantní tloušťce) a zpravidla se zvětšuje i s rostoucí tloušťkou kolimátoru. Tyto trendy ale nejsou vůbec jednoduché a zvláště pro malé průměry otvoru je závislost na tloušťce velmi výrazná. Pro velké průměry kolimátoru se vliv tloušťky zmenšuje a charakteristická vzdálenost vidění je úměrná průměru otvoru. Vliv útlumu absorpcí záření v mediu se dle aproximace (7) projeví jen při větších tloušťkách kolimátoru, jinak převládají vlivy spíše geometrické.

<sup>1</sup> Algoritmus MC se chová tak, jakoby tenká vrstva kolimátoru nedokázala dokonale odstínit celý detektor, i když to vzhledem k vysoké hodnotě součinitele útlumu olova vyvolává pochybnosti.



Obr.7 Charakteristická vzdálenost vidění (převrácená hodnota rychlosti poklesu v počátku  $z=0$ ) jako funkce průměru kolimátoru  $d$  a tloušťky  $h$ . Porovnání případu s absorbujícím a neabsorbujícím prostředím (čárkovaná, resp. plná čára) dle metody VF, rov.(7),  $a=15 \text{ m}^{-1}$ .

Výše uvedené úvahy jsou spíše jen kvalitativní, ale mohou sloužit jako vodítko při posuzování výsledků a trendů získaných přesnějšími metodami (MC) či experimentálně. Simulační výpočty prováděné metodou Monte Carlo pro měkký zářič Tc99 předpovídaným trendům upřímně řečeno příliš neodpovídají, i když je pravdou, že ze simulovaných dat v poměrně řídké síti bodů se dala rychlost útlumu pro  $z=0$  počítat jen se značnou nepřesností (regresní analýzou). Výsledky jsou uvedeny na obr. 8 pro tři počítané průměry kolimačního otvoru



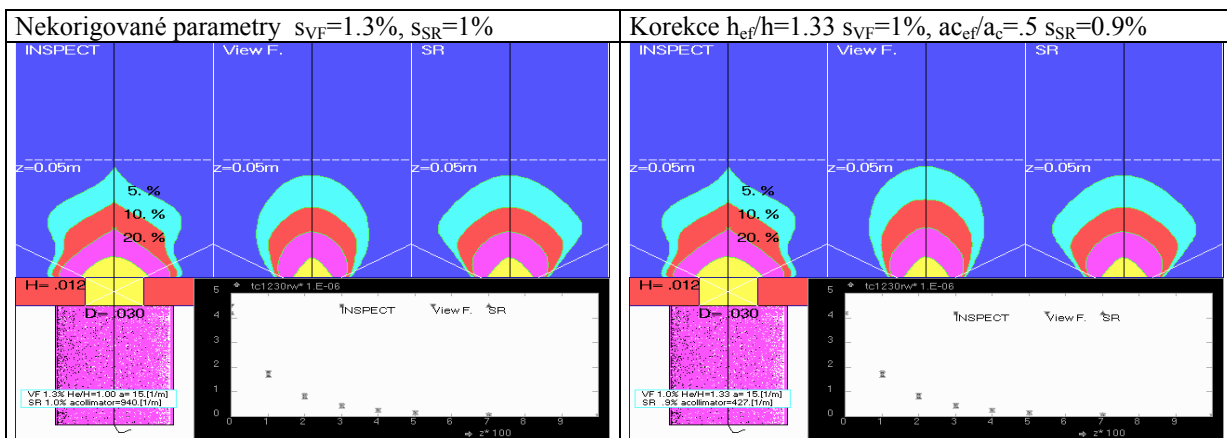
Obr.8 Porovnání vzdálenosti vidění počítané dle (7) pro  $a=15 \text{ [1/m]}$  (spojité čáry) s predikcí programem INSPECT (čárkované čáry a body). Průměry kolimačního otvoru  $d=4.8, 14$  a  $30 \text{ mm}$ .

#### 4. Korekce algoritmů VF a SR

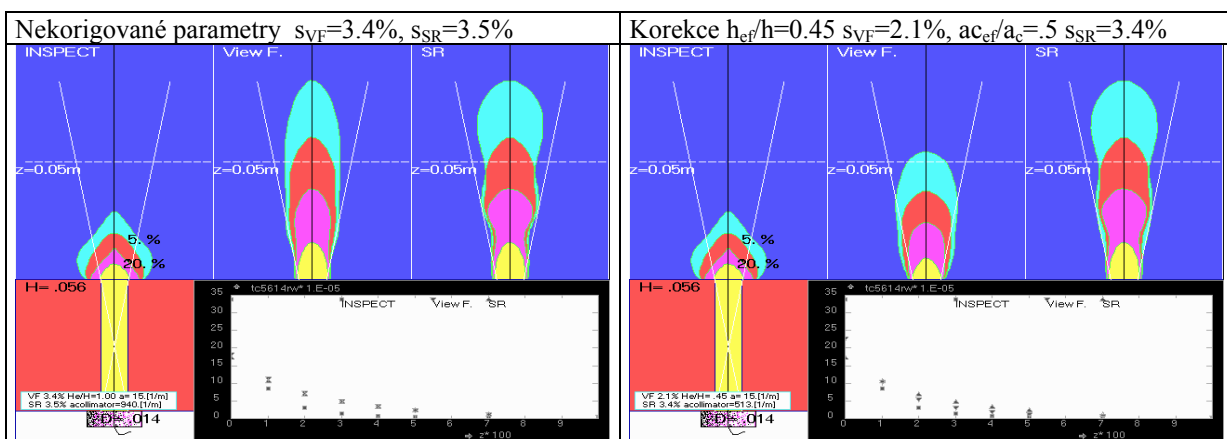
Pro hodnocení přesnosti popisu metodami VF a SR byly testovány různé normy odchylek. Zpracovávaly se odchylky odezev v  $n$  bodech  $r, z$  ( $n$  je typicky 20 až 50 bodů) odpovídajících polohám bodového zdroje pro něž byly k dispozici výsledky programu INSPECT (Monte Carlo) nebo experimentální data. Ukázalo se, že trendy odchylek na volbě normy příliš nezáleží, a proto v dalším textu budeme uvažovat pouze tu nejjednodušší normu

$$s_{VF} = \frac{\sum_{i'=1}^n |N_{MC,i} - N_{VF,i}|}{\max(N_{MC,i})n} \quad s_{SR} = \frac{\sum_{i'=1}^n |N_{MC,i} - N_{SR,i}|}{\max(N_{MC,i})n} \quad (8)$$

Algoritmy VF a SR se mohou poněkud více přiblížit realitě použitím korekcí, spočívajících v tom, že se při výpočtu uvažuje korigovaná tloušťka kolimátoru  $h_{ef}$ , modifikovaný součinitel absorpce prostředí  $a_{ef}$  nebo kolimátoru  $a_{c,ef}$ . Hodnoty těchto parametrů se stanoví programem založeným na minimalizaci norem (8). Ukázky výsledků jsou na následujících obrázcích 9 a 10



Obr.9 Porovnání výsledků MC, VF, SR pro geometrii kolimátoru  $d=30\text{mm}$ ,  $h=12\text{mm}$ . Zářič Tc99m, voda. Použita modifikace algoritmů VF a SR dle rov. (5).



Obr.10 Porovnání výsledků MC, VF, SR pro geometrii kolimátoru  $d=14\text{mm}$ ,  $h=56\text{mm}$ . Použita modifikace algoritmů VF a SR (5). Pro tuto geometrii se projevuje zvláštní anomálie INSPECTu, který predikuje velmi rychlý útlum, což se algoritmus VF snaží postihnout radikálním zvětšením úhlu vidění ( $h_{ef}/h=0.45$ ).

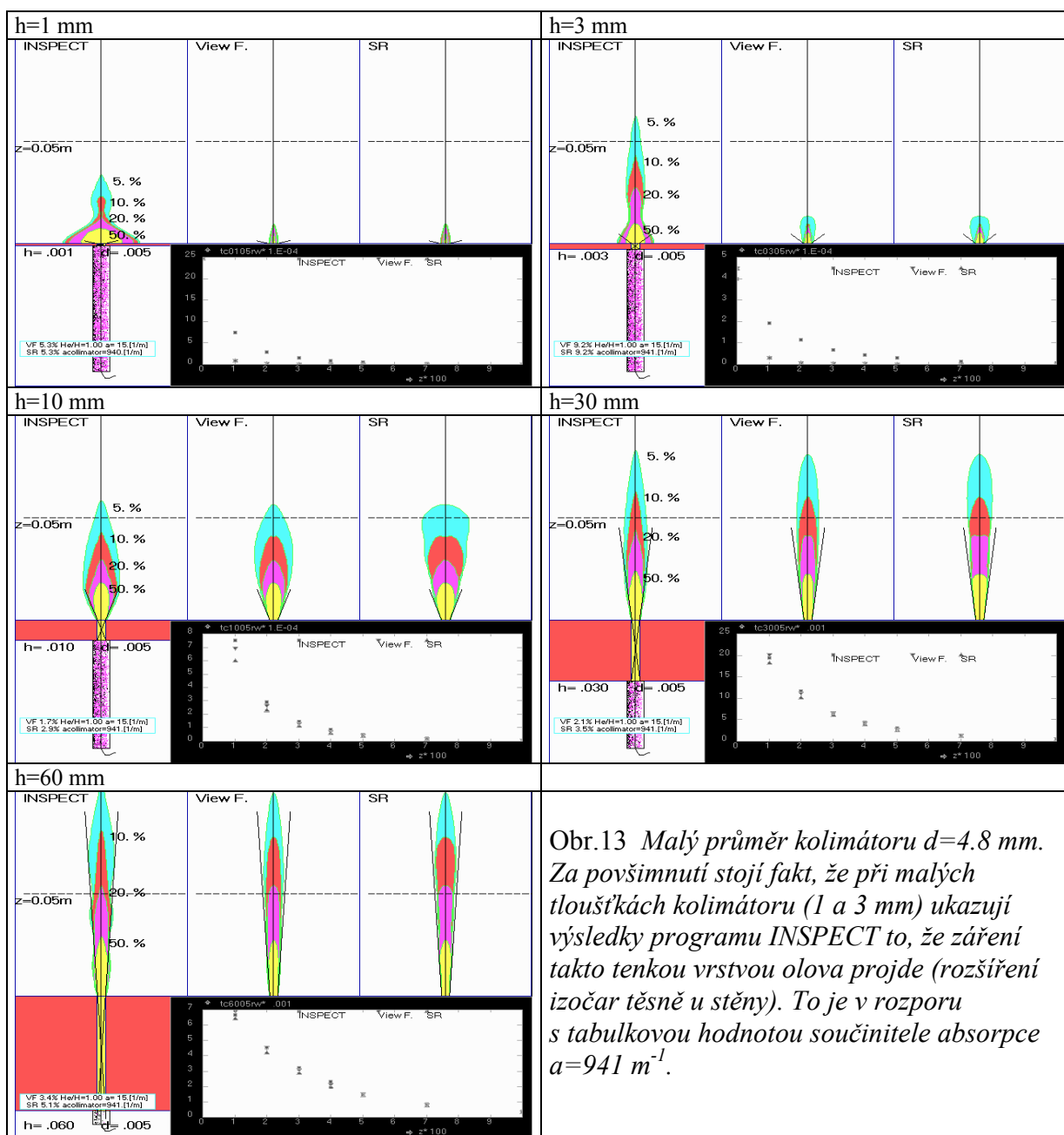




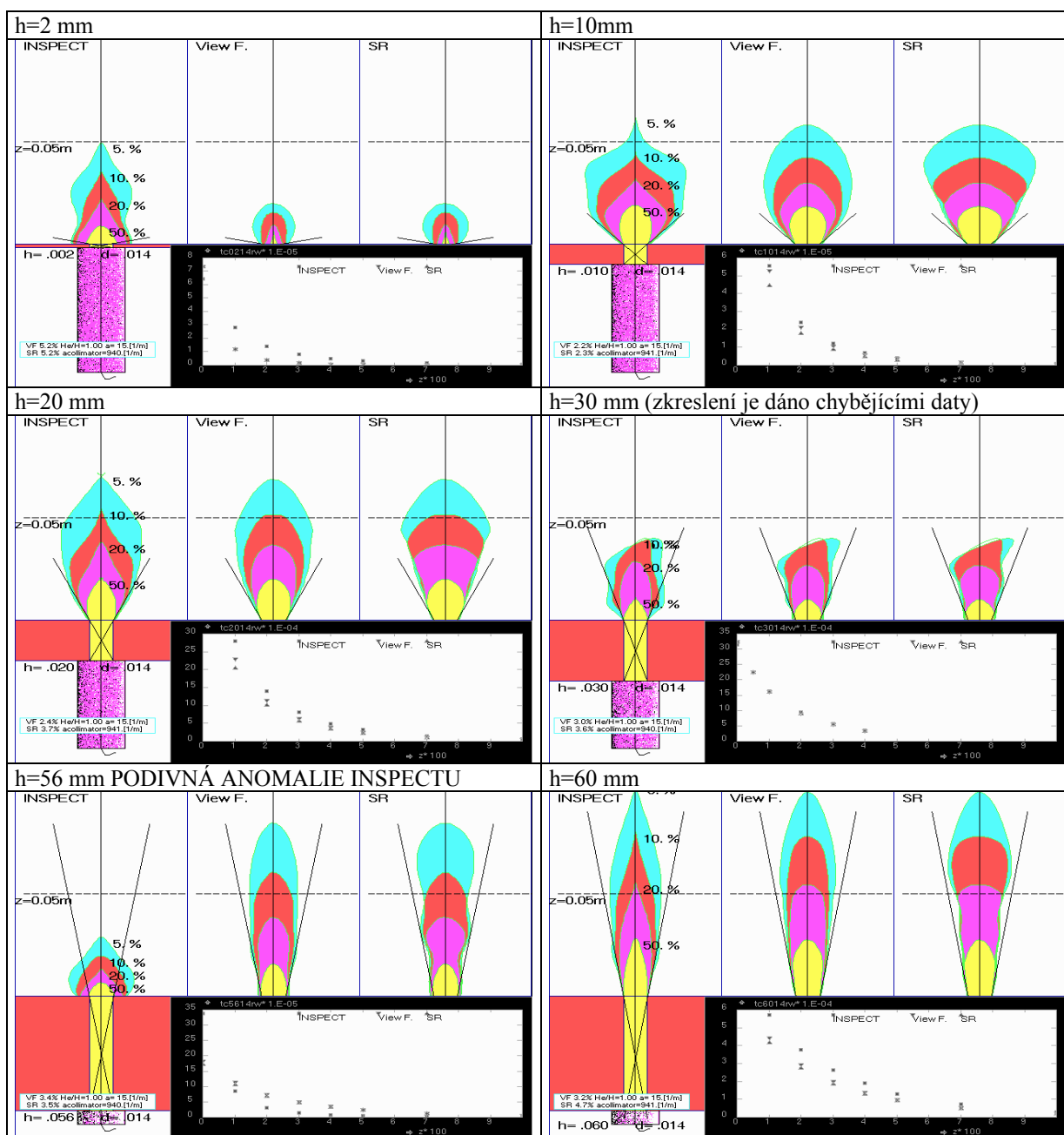
Z uvedených výsledků plyne to, že navržené korekce  $h_{ef}$ ,  $ac_{ef}$  nemají zásadní vliv a alespoň v uvedeném případě (měkký zářič – voda) jsou asi zbytečné. Dále je patrné to, že pro malé poměry  $h/d$  se zdá být vhodnější metoda SR, zatímco pro vyšší hodnoty  $h/d$  je lepší VF. To je celkem logické – silnější stěna kolimátoru představuje dokonalejší stínění a VF metoda předpokládá dokonce ideální stínění. Rozptyl dat je bohužel natolik veliký, že se nedá hovořit o spolehlivých závislostech odchylek či poměrů  $h_{ef}/h$  na geometrii systému. Velký rozptyl je způsoben tím, že počet bodů  $(r,z)$  v nichž byla prováděna časově náročná simulace je malý a navíc tyto body nebylo možné optimálně rozmístit apriori. Všechny zde uváděné výsledky jsou proto jen orientační.

## 5. Vizuální porovnání metod VF,SR s metodou Monte Carlo

Následující serie obrázků se týká porovnání teoretické predikce tří algoritmů: MC (program INSPECT), VF a SR dle modifikace (5) na krátkou vzdálenost bez korekcí  $h,a$ . Výsledky MC uvažují jen primární záření. Jako bodový zdroj záření uvažováno Tc99, medium voda (tabulková hodnota koeficientu lineárního útlumu  $a=15\text{ m}^{-1}$ ), kruhový olověný kolimátor (tabulková hodnota  $ac=940\text{ m}^{-1}$ ), válcový detektor o průměru 50 mm.



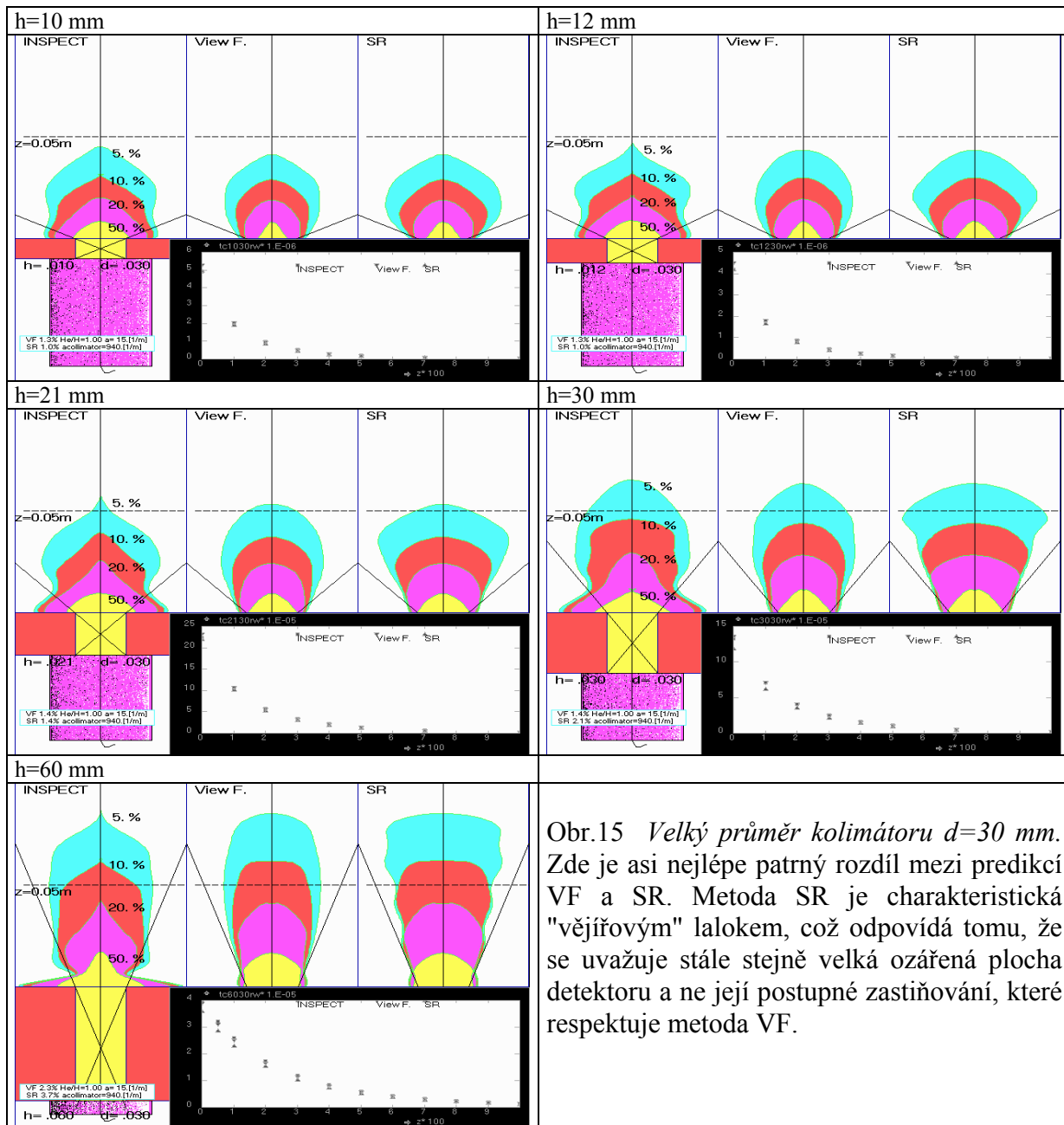
Z obr.13 plyne, že s rostoucí tloušťkou kolimátoru se poněkud zvyšuje dosah vidění detektoru. To je trend, který odpovídá předchozí analýze metodou VF, srovnej s obr.8.



Obr.14 Střední průměr kolimátoru  $d=14\text{mm}$ .

*I v této sérii se objevuje rozpor mezi predikcí INSPECTU a tabulkovou hodnotou útlumu olova. V této sérii výsledků se objevuje dříve již zmíněná anomálie INSPECTU pro  $h=56\text{ mm}$ .*

Série výsledků uvedených na obr.14 neumožňuje jasnou interpretaci – kdyby nebylo některých anomálií, platil by stejný závěr jako u předchozí geometrie: "Čím tlustší stěna kolimátoru, tím větší dosah vidění". Střední dosah vidění je zhruba stejný jako u předchozí geometrie s menším průměrem otvoru.



Obr.15 Velký průměr kolimátoru  $d=30$  mm. Zde je asi nejlépe patrný rozdíl mezi predikcí VF a SR. Metoda SR je charakteristická "vějířovým" lalokem, což odpovídá tomu, že se uvažuje stále stejně velká ozářená plocha detektoru a ne její postupné zastiňování, které respektuje metoda VF.

Stejně jako v předchozích případech je patrná tendence zvětšování dosahu vidění s rostoucí tloušťkou kolimátoru. U této série výsledků vyvolává pochybnosti skutečnost, že i když je vrstva stínění silná, predikuje INSPECT pozoruhodně vysoké hodnoty těsně u stěny. Tato oblast se dokonce s rostoucí tloušťkou kolimátoru rozšiřuje! Zatím nemáme jiné vysvětlení než to, že INSPECT počítá chybně.

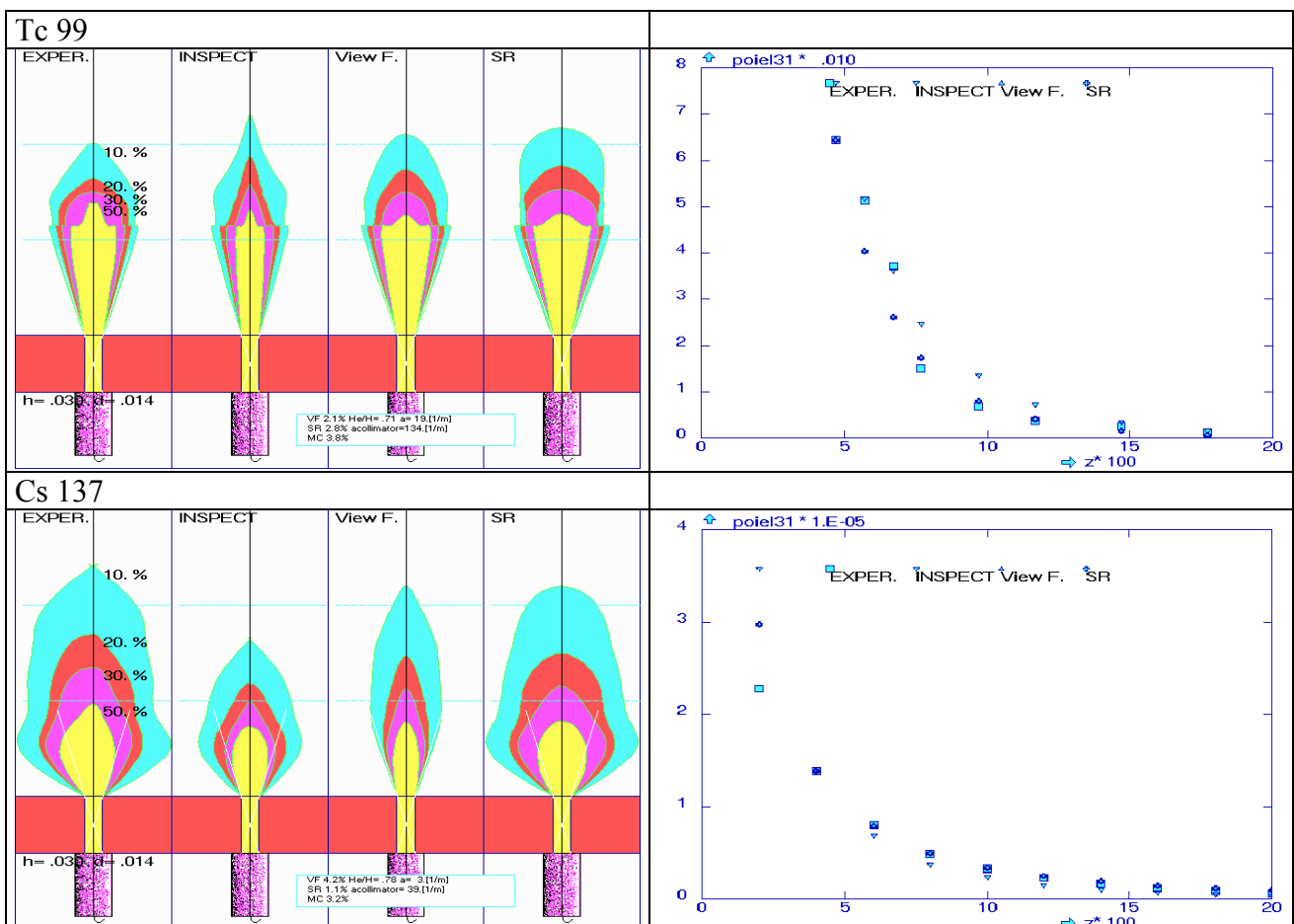
## 6. Porovnání výsledků metody Monte Carlo, VF a SR s experimentem

Experimentální odezvy na tzv. "bodový" zdroj (radioaktivního  $^{99m}\text{Tc}$  s energií záření 140 keV a  $^{137}\text{Cs}$  s energií 662 keV) umístěném ve vodě byly proměřeny pro různé vzdálenosti od čelní strany stínícího olověného bloku s kolimačním otvorem o průměru 1.4 cm a hloubce 3 cm, ve kterém byl zasunut scintilační detektor (NaI (Tl) krystal o průměru 5 cm a výšce 3.5 cm).

Pro všechny proměřované polohy zdrojů záření byly provedeny simulační výpočty programem INSPECT a algoritmy VF a SR bez i s korekcemi na tloušťku stínění. Výsledky seřazené dle velikosti odchylky (8) jsou uvedeny v následující tabulce

Tabulka 2.

Metoda	s [%]	korigované parametry
<b>Tc 99m</b>	$h=30 \text{ mm}, d=14 \text{ mm}, a=15 \text{ m}^{-1}, ac=940 \text{ m}^{-1}$	
VF <sub>ha</sub>	2.13	$h_{ef}=21 \text{ mm}, a_{ef}=19.5 \text{ m}^{-1}$
VF <sub>h</sub>	2.36	$h_{ef}=21 \text{ mm}$
SR <sub>aa</sub>	2.79	$ac_{ef}=134 \text{ m}^{-1} a_{ef}=19.4 \text{ m}^{-1}$
SR <sub>a</sub>	3.10	$ac_{ef}=97 \text{ m}^{-1}$
VF	3.26	
<b>INSPECT</b>	3.60	
<b>INSPECT(win)</b>	3.77	
SR	5.17	
<b>Cs 137</b>	$h=30 \text{ mm}, d=14 \text{ mm}, a=9 \text{ m}^{-1}, ac=55 \text{ m}^{-1}$	
SR <sub>aa</sub>	1.09	$ac_{ef}=39 \text{ m}^{-1} a_{ef}=3.1 \text{ m}^{-1}$
SR <sub>a</sub>	2.12	$ac_{ef}=43 \text{ m}^{-1}$
<b>INSPECT</b>	2.16	
SR	2.32	
<b>INSPECT(win)</b>	3.20	
VF <sub>ha</sub>	4.18	$h_{ef}=23 \text{ mm} a_{ef}=1 \text{ m}^{-1}$
VF <sub>h</sub>	5.34	$h_{ef}=27 \text{ mm}$
VF	5.39	



Obr.16 Porovnání experimentu s metodami MC, VF, SR

Z výsledkové tabulky 2 plyne

- a) Metoda Monte Carlo využívající zrychlený algoritmus implementovaný v programu INSPECT má horší shodu s experimentem než jednoduché algoritmy VF u měkkého zářiče a SR u tvrdšího zářiče. Dokonce i tehdy, když se neprovedou žádné korekce VF a SR algoritmů na tloušťku nebo součinitel útlumu detektoru. To je překvapující.
- b) Metoda Monte Carlo uvažující rozptýlené záření dává v obou případech poněkud (i když ne příliš) lepší shodu s experimentem než když se rozptýlené záření nezapočítává (build-up faktor = 1), což by mělo odpovídat případu, kdy detektor měří v tzv. energetickém okně, tj. když pulsy rozptýleného záření s nižší energií fotonů jsou odfiltrovány. I to je překvapivé, protože měřicí aparatura ROBOTRON byla nastavena pro měření v energetickém okně.
- c) Pro měkké záření Tc99 je nejlepší shoda s experimentem dosaženo VF metodou, zatímco pro tvrdší záření Cs137 metodou SR. To odpovídá očekávání, resp. je to v souladu s předpoklady platnosti VF a SR algoritmů – VF metoda předpokládá dokonale absorbující kolimátor, což je akceptovatelné u Tc, ale ne u Cs.

## 7. Závěr

Z analýzy výsledků vyplývá, že algoritmus odvozený na základě detektorem viděného objemu je vhodnější pro gama indikátory s nízkou energií a pro detekční systém s dobře odstíněným detektorem, kdežto „jednopaprskový“ algoritmus lze doporučit pro indikátory s vyšší energií záření nebo při použití indikátoru s nižší energií záření s nevhodně stíněným detektorem.

Jednoduchost navržených analytických algoritmů se uplatní zejména při vyhodnocování velkých souborů dat získaných programy CFD.

## 8. Použitá literatura

- [1] Lux I., and Koblinger, L., : Monte Carlo particle transport methods: Neutron and photon. CRC Press, 1991
- [2] Tola F., Ecrin, code Monte Carlo de simulation de la reponse dun detecteur a un melange de traceurs radioactifs unifirmement distribues dans une conduite cylindrique , Internal Report CEA/DTA/DAMRI/SAR/96-111/T40, 1996
- [3] Thýn J. a Žitný R, Klusoň J., Čechák T.: Analysis and Diagnostics of Industrial Processes by Radiotracers and Radioisotope Sealed Sources, ČVUT Praha 2000
- [4] Žitný R, Thýn J.: Verification of CFD predictions by Tracer Experiments, International Conference CHISA 2000, Prague, 28-31 August, 2000
- [5] Tola F., Logiciels d'aide a la Conception et l' optimisation de Janges nucleaires, Internal Report CEA/DTA/DAMRI/SAR/S/RAP/99-116/T44, 1999
- [6] Blet V., Berne Ph., Legoupil S., Tola F., Vitart X.: Recent Development in Radiotracer Methology. International Conference CHISA'98, Prague, August, 1998

## Dodatek

### 3R algoritmus

V případě, že je průměr detektoru výrazně větší než průměr kolimačního otvoru a dále tehdy, když je stínící vrstva tenká lze použít třípaprskový algoritmus koncepčně shodný s jednopaprskovým (SR). Princip úpravy je patrný z obrázku

Vzdálenost zdroj - detektor

$$l_i = \sqrt{(R \mp r)^2 + (z + h)^2}, \quad i=1,2$$

Délka části paprsku v mediu

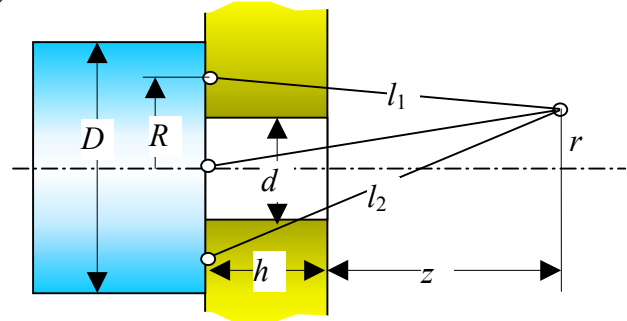
$$l_{mi} = l_i \left(1 - \frac{h}{h+z}\right)$$

Délka části paprsku v materiálu stínění

$$l_{ci} = l_i \min\left(\frac{h}{h+z}, \frac{R-d/2}{R \mp r}\right)$$

Příspěvek paprsků 2,3 k signálu detektoru, odpovídající mezikruží zastíněného čela detektoru.

$$N_i = \frac{(D^2 - d^2)(z+h)}{32l_i^3} e^{-a l_{mi} - a_c l_{ci}}$$

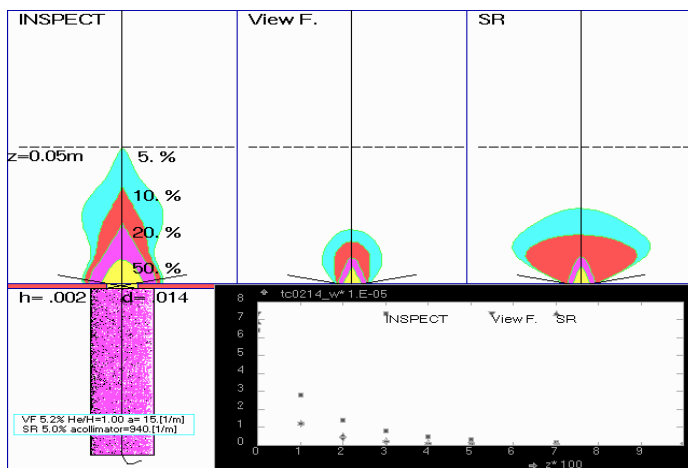


Programová realizace modifikovaného algoritmu

```
function colisr(z,r,d,h,amu,acol)
parameter (pi=3.141)
real lh, lh2, l1, l2, lm1, lm2, lc1, lc2
r1=d/2
r12=r1**2
e=h*r/z
zh=z+h
lh2=zh**2+r**2
lh=sqrt(lh2)
rlm=sqrt((r-r*h/zh)**2+(h-zh)**2)
if(r/zh.le.r1/h) then
    rlc=0
else
    rlc=sqrt((r1-r*h/zh)**2+(h-zh*r1/r)**2)
endif
colisr=zh*exp(-amu*rlm-acol*rlc)/2*
/ (1./lh-1./sqrt(lh2+r12))

det=0.05
br=(det+d)/4
ds=pi*(det**2-d**2)/8
l1=sqrt((br-r)**2+zh**2)
l2=sqrt((br+r)**2+zh**2)
lm1=l1*(1-h/zh)
lm2=l2*(1-h/zh)
if(r.lt.br) then
    lc1=l1*amin1(h/zh, (br-d/2)/(br-r))
else
    lc1=l1*h/zh
endif
lc2=l2*amin1(h/zh, (br-d/2)/(br+r))
colisr=colisr+ds*zh/(4*pi)* (exp(-amu*lm1-
acol*lc1)/l1**3+
/ exp(-amu*lm2-acol*lc2)/l2**3)
end
```

Aplikujeme-li 3R algoritmus na data odpovídající obrázku 5, dostaneme o něco lepší výsledek, znázorněný na následujícím obr.17. Stávající verze algoritmu je však jen provizoriem, které nemá příliš vhodné vlastnosti pro malé vzdálenosti zdroje záření od čela detektoru.



Obr.17 3R algoritmus pro  $D=50\text{mm}$ ,  $d=14\text{mm}$