

WŁADYSŁAW ŁUKASZEK

Katedra Teorii Maszyn Ciepłych

PROPOZYCJE ZAWĘŻENIA ANALIZY OSŁABIENIA FOTONÓW  
W NIEOGRANICZONYM OŚRODKU MATERIALNYM

Streszczenie. W pracy podaje się modyfikację obliczeń parametrów osłony biologicznej przy zastosowaniu metod Monte-Carlo. Rozważana osłona posiada postać płyty nieograniczonej a wiązka promieniowania gamma jest prostopadła i monokierunkowa. Modyfikacja polega na fikcyjnym ograniczeniu geometrii (rozmiarów) osłony do pewnego jej fragmentu przestrzennego. Analizę fotonów prowadzi się w zakresie wyodrębnionego fragmentu. Wpływ odrzuconej części osłony ujmuje się przez wprowadzanie do fragmentu tzw. fotonów zewnętrznych (wprowadzonych).

Określa się warunki jakie muszą być spełnione aby został wprowadzony foton zewnętrzny. Ponadto podaje się zasady porządkowania parametrów fotonom wprowadzanym (zewnętrznym).

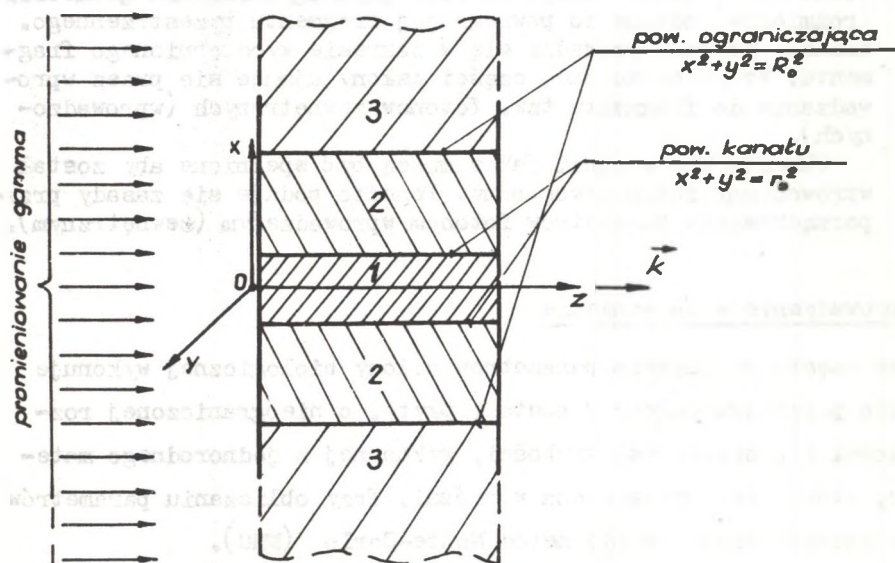
1. Wprowadzenie w zagadnienie

Bardzo często obliczenia parametrów osłony biologicznej wykonuje się dla przypadku osłony w postaci płyty, o nieograniczonej rozciągłości i o skończonej grubości, wykonanej z jednorodnego materiału, która jest umieszczona w próżni. Przy obliczaniu parametrów stale wzrasta zastosowanie metod Monte-Carlo (MMC).

W MMC śledzi się historię fotonu czyli ciąg zdarzeń jakiemu podlega foton w obszarze osłony. Jeżeli prześledzi się odpowiednio dużą liczbę historii mogą być określone interesujące parametry osłony. Dokładność obliczeń wykonywanych MMC jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z liczby przeanalizowanych historii [2]. Z tej racji, w szczególności przy większych grubo-

ciach osłony konieczne jest przeprowadzenie obliczeń za pomocą matematycznych maszyn cyfrowych. Z drugiej strony pożądane są modyfikacje sprzyjające ograniczeniu czasu maszynowego obliczeń.

Jedną z metod ograniczenia czasu obliczeń przy zastosowaniu MMC jest fikcyjne ograniczenie osłony. W rozpatrywanym przykładzie osłony w postaci płyty na którą pada monokierunkowe promieniowanie gamma, ograniczenie takie sprowadza się do odrzucenia części osłony, znajdującej się zewnątrz pewnego fragmentu zamkniętego powierzchnią ograniczającą. Zgodnie z przyjętym układem współrzędnych, powierzchnia ograniczająca przedstawiona na rys. 1 jest walcem kołowym o promieniu  $R_0$  a osią tego walca jest oś Z.



Rys. 1. Osłona w postaci płyty i podział jej na obszary

Zakłada się, że analizę fotonów w osłonie zawęzi się do fragmentu zamkniętego cylindryczną powierzchnią ograniczającą i przeprowadzi się ją w taki sposób aby uzyskane wyniki były ważne dla płyty nieograniczonej. Za takim podejściem przemawia fakt, że prowadze-

nie obliczeń dla punktów wejścia i wyjścia fotonów, dość odległych od osi fragmentu jest rzeczą niepotrzebną i niemożliwą.

Podobne wnioski można wyciągnąć również w bardziej złożonym przypadku a mianowicie gdy analizowany fragment nie jest jednorodny. Niech powierzchnia ograniczająca będzie koncentryczną w stosunku do kanału cylindrycznego o promieniu  $r_0$ , który może być wypełniony dowolnym materiałem. Zaburzający wpływ kanału ujawni się w obszarze zlokalizowanym, niezbyt odległym od jego brzegów. Fikcyjne ograniczenie osłony jest zatem korzystne również w przypadku ośrodka niejednorodnego i sprowadza się do warunku aby  $R_0 \gg r_0$ . Ponieważ nie ma wytycznych jak wielki w konkretnym przypadku winien być stosunek  $K = \frac{R_0}{r_0}$ , dlatego w obliczeniach z fikcyjnym ograniczeniem osłony będą uwzględniane dodatkowe fotony wprowadzane przez powierzchnię ograniczającą do wyodrębnionego fragmentu.

W dalszych rozważaniach wprowadzi się pewne oznaczenia obszarów przestrzeni. Wnętrze kanału określi się jako obszar 1, zewnątrz kanału i wewnątrz powierzchni ograniczającej - jako obszar 2, natomiast odrzuconą część osłony oznaczy się jako obszar 3. Ponadto wprowadzi się dwa rodzaje wyodrębnionych fragmentów osłony, posiadających identyczną geometrię lecz różniących się składem materiałowym. W pierwszym z nich, jednorodnym J, obszary 1 i 2 będą wykonane z tego samego materiału co obszar 3. W drugim niejednorodnym N, obszar 1 może być wypełniony innym dowolnym materiałem.

## 2. Obraz przepływu fotonów przez powierzchnię ograniczającą

Mając na uwadze fragment J z dołączonym obszarem 3 można podać następujące uwagi o rozkładzie fotonów przy powierzchni ograniczającej:

Pewna część fotonów rozproszonych w fragmencie J przechodzi do ośrodka 3 i odwrotnie. Dla wybranego elementu powierzchni ograniczającej wystąpi stan równowagi. Stan ten ujawni się w taki spo-



sób, że liczba fotonów przecinających ten element od strony dodatniej (po przyjęciu pewnej orientacji tego elementu) jest równa liczbie fotonów przecinających ten element od strony ujemnej.

W przypadku fragmentu N z dołączonym obszarem 3 należy oczekiwać również opisanego stanu równowagi dla elementów powierzchni ograniczającej, pod warunkiem, że powierzchnia ta wybrana zostanie dostatecznie daleko, tzn., że będą wchodzić w rachubę odpowiednio duże wartości K. Jeżeli wartości K są zbyt małe, materiał obszaru 1 może wpływać rozmaicie na opisany rozkład fotonów przy powierzchni ograniczającej. Wypełniając obszar 1 materiałem silniej pochłaniającym od materiału obszaru 2, pewne fotony fragmentu N posiadać będą gorsze warunki penetracji w porównaniu z fragmentem J. Liczba fotonów wprowadzanych do fragmentu N z zewnątrz musi być w tym przypadku większa od liczby fotonów faktycznie uciekających przez powierzchnię ograniczającą. Materiał obszaru 2 może być silniej pochłaniający w porównaniu z materiałem obszaru 1 i wtedy niektóre fotony mają większe szanse ucieczki z fragmentu N aniżeli z fragmentu J. Liczba fotonów wprowadzanych do fragmentu N z zewnątrz musi być w tym przypadku mniejsza od liczby fotonów faktycznie uciekających przez powierzchnię ograniczającą.

Decyzja o tym czy fotonowi analizowanemu w fragmencie N odpowie foton wprowadzony, podejmowana będzie w sposób losowy, zgodnie z istotą MMC. Na decyzję tego rodzaju mieć będą wpływ zjawiska jakim podlega foton w punkcie oddziaływania z materiałem fragmentu oraz warunki rozprzestrzenienia się fotonu w obrębie fragmentu. W tym celu zostaną naprzód określone, a później wykorzystane prawdopodobieństwo pochłonięcia i prawdopodobieństwo oddziaływania.

### 3. Prawdopodobieństwo pochłonięcia

Zakłada się, że foton o energii  $E_{i-1}$  oddziałuje w punkcie  $P_i$  fragmentu N lub J. Prawdopodobieństwo pochłonięcia określone może być przy pomocy wzoru

$$y \cdot (P_i, E_{i-1}) = \frac{\mu_{f..} + \mu_{p..}}{\mu.} \quad (1)$$

gdzie:

- $\mu_{f..}$  - współczynnik zjawiska fotoelektrycznego,  $\text{cm}^{-1}$ ,
- $\mu_{p..}$  - współczynnik zjawiska powstawania par,  $\text{cm}^{-1}$ ,
- $\mu.$  - pełny współczynnik oddziaływania,  $\text{cm}^{-1}$ .

Kropka może być zastąpiona literą N lub J i wówczas określi się odpowiednio prawdopodobieństwo pochłonięcia w fragmencie N lub prawdopodobieństwo pochłonięcia w fragmencie J. Warto zwrócić uwagę, że współczynniki we wzorze (1) są funkcjami nie tylko energii lecz również materiału. Z tej ostatniej przyczyny, pomimo geometrycznego przystawiania fragmentów i pokrywania się punktów oddziaływania, wartości współczynników obliczone dla fragmentów N i J wcale nie muszą być równe.

### 4. Prawdopodobieństwo oddziaływania

Jeżeli foton w punkcie  $P_i$  nie został pochłonięty lecz rozproszone, doznaje zmianę kierunku i energii. Niech nowy kierunek określony będzie wektorem jednostkowym  $\vec{\omega}_i (\omega'_i, \omega''_i, \omega'''_i)$ , a nowa energia niech będzie równa  $E_i$ . Prawdopodobieństwo oddziaływania wzdłuż drogi określonej wektorem  $\vec{\omega}_i$  może być wyrażone zależnością

$$p \cdot (E_i) = 1 - e^{-\sum_j \mu_{j..} l_j} \quad (2)$$

gdzie:

- $\mu_{j,0}$  - współczynnik oddziaływania przy energii  $E_1$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ,  
 $l_j$  - długość toru fotonu w obszarach 1 lub 2, cm.

Podobnie jak we wzorze (1) kropka może być zastąpiona indeksem N lub J. Suma w wykładniku potęgi rozciągnięta jest na wszystkie odcinki  $l_j$  toru fotonu, przynależne do obszarów 1 i 2. Odpowiednie odcinki  $l_j$  toru fotonu są identyczne dla fragmentów N i J. Wartości współczynników obliczone dla odcinków  $l_j$  fragmentów N i J mogą być jednak różne ze względu na możliwe różnice materiałowe.

### 5. Kategorie fotonów

W toku dalszej analizy wygodnie będzie odnosić rozważania do jednej z dwóch kategorii fotonów.

Kategorię pierwszą stanowią fotony które:

- a) ulegają rozproszeniu w punkcie  $P_1$  obszaru 1,
- b) trajektoria fotonu określona wektorem  $\vec{w}_1$  przebija powierzchnię ograniczającą.

Kategorię drugą stanowią fotony które:

- a) ulegają rozproszeniu w punkcie  $P_1$  obszaru 2,
- b) trajektoria fotonu określona wektorem  $\vec{w}_1$  (przecinająca lub nie przecinająca obszar 1) przebija powierzchnię ograniczającą.

Dla fotonów kategorii pierwszej oblicza się prawdopodobieństwa pochłonięcia, natomiast w przypadku fotonów kategorii drugiej wykorzystuje się prawdopodobieństwa oddziaływania.

Losowanie fotonu zwracanego przeprowadza się przez wybór liczby pseudolosowej  $\alpha_1 \leq 1$  i porównanie jej z obliczonymi prawdo-

podobieństwami (w zależności od kategorii fotonu) pochłonięcia lub oddziaływania.

Poniżej omówi się oddzielnie postępowanie dla każdej kategorii fotonu. Ilustrację omówienia stanowi rys. 2.

## 6. Fotony kategorii pierwszej

Przypadek  $y_N = y_J$ . Foton znajduje się w identycznych warunkach w fragmencie N i J, jeżeli chodzi o rozstrzygnięcie rodzaju oddziaływania. W związku z losowaniem liczby  $\alpha_i$  mogą zajść dwa podprzypadki

$$\alpha_i \leq y_N = y_J, \quad (3a)$$

$$y_N = y_J < \alpha_i \leq 1, \quad (3b)$$

z których (3a) oznacza pochłonięcie i zakończenie historii fotonu, natomiast (3b) oznacza rozproszenie w fragmencie N i J.

Przypadek  $y_N < y_J$ . Przy losowaniu liczby  $\alpha_i$  mogą zajść trzy podprzypadki

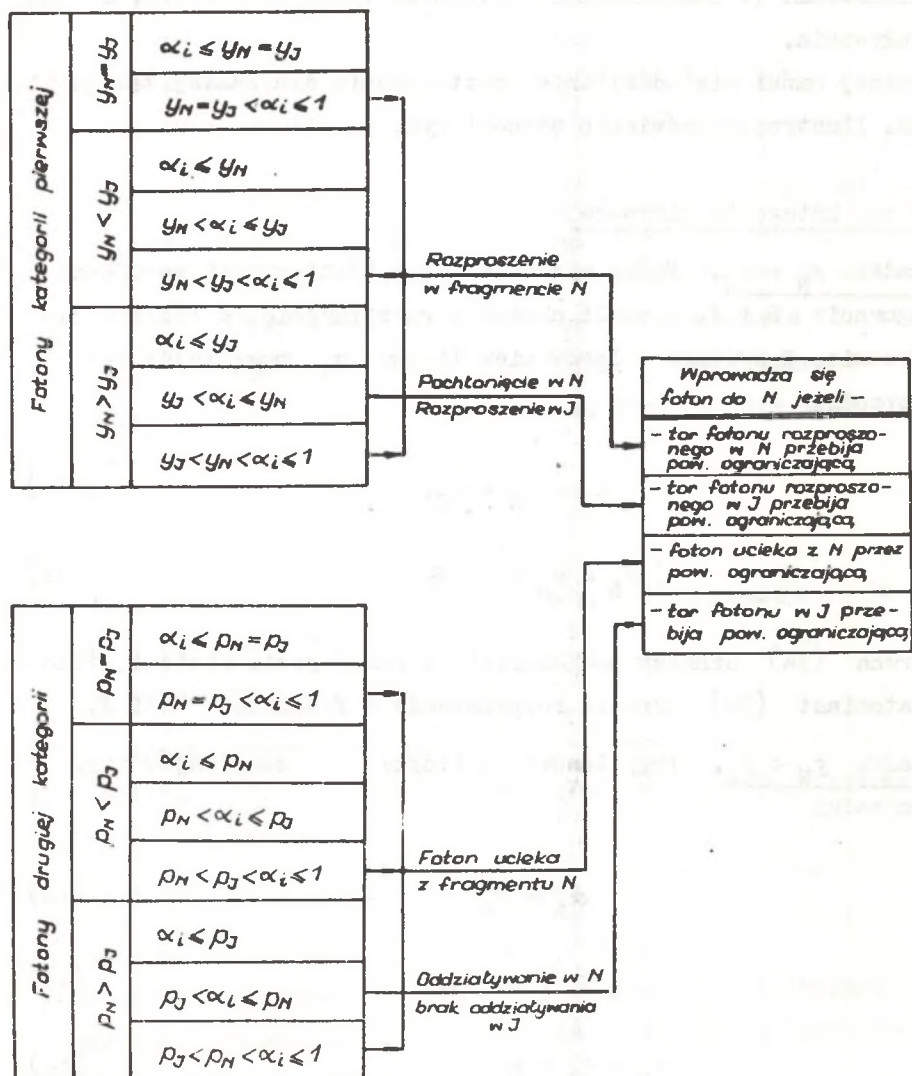
$$\alpha_i \leq y_N, \quad (4a)$$

$$y_N < \alpha_i \leq y_J, \quad (4b)$$

$$y_N < y_J < \alpha_i \leq 1. \quad (4c)$$

Podprzypadek (4a) oznacza, że foton zostanie pochłonięty niezależnie od tego czy śledzi się jego historię w fragmencie N czy też w fragmencie J.





Rys. 2. Zestawienie możliwych podprzypadków związanych z losowaniem fotonu wprowadzanego



Podprzypadek (4b) oznacza, że nastąpi rozproszenie w fragmencie N natomiast w fragmencie J foton będzie pochłonięty. Ze względu na fragment N historię fotonu śledzi się dalej. Na danym etapie obliczeń z fotonem tym nie łączy się fotonu wprowadzanego, ponieważ w fragmencie J, w którym istnieje równowaga, historia fotonu zostałaby zakończona.

Podprzypadek (4c) oznacza, że foton zostanie rozproszony zarówno w fragmencie N jak i w fragmencie J.

Przypadek  $y_N > y_J$ . Możliwe są trzy podprzypadki

$$\alpha_1 \leq y_J, \quad (5a)$$

$$y_J < \alpha_1 \leq y_N, \quad (5b)$$

$$y_J < y_N < \alpha_1 \leq 1. \quad (5c)$$

Podprzypadek (5a) oznacza pochłonięcie fotonu w fragmencie N i J. Podprzypadek (5b) łączy się z pochłonięciem fotonu w fragmencie N i z rozproszeniem w fragmencie J. Historię tego fotonu uważa się za zakończoną w zakresie fragmentu N, natomiast w fragmencie J śledzi się dalej jego historię z uwagi na możliwość wprowadzenia fotonu zewnętrznego. Śledzenie historii fotonu w fragmencie J ogranicza się do stwierdzenia jednego z dwóch zdarzeń: pochłonięcia w pewnym punkcie  $P_{i+1}$  lub ucieczki z fragmentu. Jeżeli ucieczka z fragmentu J następuje przez powierzchnię ograniczającą wówczas do fragmentu N wprowadza się foton zewnętrzny. Przy pochłonięciu lub ucieczce z fragmentu J przez ściany płaskie, foton zewnętrzny do fragmentu N nie zostaje wprowadzony. Podprzypadek (5c) oznacza rozproszenie fotonu w fragmencie N i J.

Na zakończenie omawiania fotonów pierwszej kategorii należy podać zasadę ogólną: w podprzypadku w którym następuje rozproszenie fotonu w punkcie  $P_i$  fragmentu N i J zostaje wprowadzony foton zewnętrzny wtedy gdy foton rozproszony ucieka przez powierzchnię ograniczającą. Foton zewnętrzny wprowadza się do fragmentu N.

### 7. Fotony kategorii drugiej

Przypadek  $p_N = p_J$ . Przypadek ma miejsce gdy tor fotonu nie przecina obszaru i fragmentu N i łączą się z nim dwa podprzypadki

$$\alpha_i \leq p_N = p_J, \quad (6a)$$

$$p_N = p_J < \alpha_i \leq 1. \quad (6b)$$

Podprzypadek (6a) oznacza, że oddziaływanie wystąpi w obrębie fragmentu N i J.

Podprzypadek (6b) oznacza, że foton ucieka z fragmentu N i J.

Przypadek  $p_N < p_J$ . Możliwe są trzy podprzypadki

$$\alpha_i \leq p_N, \quad (7a)$$

$$p_N < \alpha_i \leq p_J, \quad (7b)$$

$$p_J < \alpha_i \leq 1. \quad (7c)$$

Podprzypadek (7a) oznacza, że oddziaływanie wystąpi w pewnym punkcie  $P_{i+1}$  fragmentu N i J, tzn. foton nie ucieknie z fragmentu. Warto zaznaczyć, że dla fragmentu J oddziaływanie jest bardziej prawdopodobne.

Podprzypadek (7b) oznacza, że ma miejsce ucieczka fotonu z fragmentu N, natomiast w fragmencie J foton będzie pochłonięty. W tej sytuacji foton przebijający powierzchnię ograniczającą fragmentu N uważa się jako uciekający z tego fragmentu.

Podprzypadek (7c) oznacza, że foton ucieka z fragmentu N i J.

Przypadek  $p_N > p_J$ . Mogą zajść trzy podprzypadki

$$\alpha_i \leq p_J, \quad (8a)$$

$$p_J < \alpha_i \leq p_N, \quad (8b)$$

$$p_N < \alpha_i \leq 1. \quad (8c)$$

Podprzypadek (8a) oznacza, że oddziaływanie wystąpi w pewnym punkcie  $P_{i+1}$  zarówno w fragmencie N jak również w fragmencie J.

Podprzypadek (8b) oznacza, że oddziaływanie wystąpi w fragmencie N lecz nie ma miejsca w fragmencie J. W tych warunkach rozpatruje się dalszą historię fotonu w fragmencie N (tzn. bada się rodzaj oddziaływania w punkcie  $P_{i+1}$  i ewentualne dalsze zdarzenia) a ponadto wprowadza się foton zewnętrzny, jeżeli tor fotonu w J łączący punkty  $P_i, P_{i+1}$  przebija powierzchnię ograniczającą.

Podprzypadek (8c) oznacza, że oddziaływanie nie występuje ani w fragmencie N ani w fragmencie J. Foton ucieka z fragmentu N i J.

Dla fotonów drugiej kategorii można podać zasadę ogólną: w podprzypadku w którym następuje ucieczka fotonu z fragmentu N i J, zostaje wprowadzony foton zewnętrzny wtedy gdy ucieczka następuje przez powierzchnię ograniczającą. Foton zewnętrzny wprowadza się do fragmentu N.

### 8. Parametry fotonu wprowadzanego (zewnątrznego)

Fotonowi wprowadzanemu do fragmentu należy przyporządkować następujące parametry:

- a) energię,  $E_w$ ,
- b) punkt wprowadzenia do fragmentu,  $P_w$ ,
- c) wektor jednostkowy toru,  $\vec{\omega}_w(\omega'_w, \omega''_w, \omega'''_w)$ .

Dla fotonu analizowanego w fragmencie znane są następujące parametry związane z rozproszeniem fotonu w punkcie  $P_i$ :

- a) energia,  $E_i$ ,
- b) punkt przebicia powierzchni ograniczającej (jeżeli taki istnieje) przez tor fotonu rozproszonego,  $P_{z,i}$  (tor fotonu jest półprostą wyprowadzoną z punktu  $P_i$ ),
- c) współrzędne wektora jednostkowego, określającego kierunek  $\vec{P}_i \vec{P}_{z,i}$ ,  $\vec{\omega}_i(\omega'_i, \omega''_i, \omega'''_i)$ .

W dalszej kolejności omówi się zasady wyznaczania parametrów fotonu wprowadzanego do fragmentu J przy analizowaniu fragmentu J.

Współrzędne wektora określającego kierunek fotonu wprowadzonego ustala się w oparciu o zasadę, że pod wpływem wiązki promieniowania monokierunkowego, rozkłady katowe promieniowania rozproszonego w ośrodku jednorodnym są zależne od kosinusa kąta, względem kierunku wiązki. Taka zależność może być interpretowana jako symetria kołowa względem kierunku  $\vec{k}$ . W związku z tym wektor  $\vec{\omega}_w$  wyznaczy się jako symetryczny do wektora  $\vec{\omega}_i$  względem kierunku  $\vec{k}$ . Na rys. 3 pokazane zostały wektory  $\vec{k}$ ,  $\vec{\omega}_i$  i  $\vec{\omega}_w$ . Punkt  $P_{z,i}$  oznacza punkt przebicia toru fotonu analizowanego w fragmencie, z zewnętrzną powierzchnią ograniczającą. Prosta l oznacza tworzącą powierzchni ograniczającej, przechodzącą przez punkt  $P_{z,i}$ .





Współrzędne punktu wejścia fotonu wprowadzanego do fragmentu przyjmuje się odpowiednio równe współrzędnym punktu przebicia toru fotonu analizowanego z powierzchnią ograniczającą. W ten sposób

$$P_w = P_{z,i}$$

Zadaniem ustalonych wartości współrzędnych wektora  $\vec{\omega}_v$  jest wprowadzenie fotonu zewnętrznego do fragmentu. Zadanie to może być niespełnione w pewnych szczególnych przypadkach związanych z ułożeniem się punktu  $P_i$  na powierzchni ograniczającej.

Analizę fotonu wprowadzonego, po określeniu jego parametrów, prowadzi się w obrębie fragmentu poczynając od punktu  $P_w$ .

## 9. Uwagi końcowe

Programowanie zasad wprowadzania fotonu zewnętrznego może być oparte na schemacie blokowym rys. 2. Podane tam zostały wszystkie możliwe podprzypadki i wyróżniono te z nich w których wprowadza się foton zewnętrzny.

Metoda Monte-Carlo w przypadku fikcyjnego ograniczenia osłony została zastosowana wcześniej w pracy doktorskiej autora [3] (do tej pory nieopublikowana). W pracy tej rozpatruje się fragment N o podobnej geometrii lecz ogranicza się analizę do przypadku gdy materiał obszaru 1 jest bardziej przezroczysty od materiału obszaru 2. Decyzja o tym czy powinien być wprowadzony foton zewnętrzny, podejmowana jest również na zasadzie losowania. W toku analizowania historii fotonu obliczane są prawdopodobieństwa rozproszenia  $(1-y)$  i prawdopodobieństwa nieoddziaływania  $(1-p)$ . Z iloczynów tych prawdopodobieństw budowane jest wyrażenie, którego wartość porównuje się z wybraną liczbą pseudolosową. Uzyskane wyrażenie jest skomplikowanej budowy (w pracy [3] nazywane jest wagą zwrotu) i uwzględnia całą "przeszłość" fotonu w sensie zaistniałych rozpro-

szeń i zdolności pokonywania poszczególnych odcinków drogi w materiale fragmentu.

Przedstawione w niniejszym artykule, zasady wprowadzania fotonu zewnętrznego, wymagają obliczania wartości  $y$  i  $p$ , których postacie są stosunkowo bardzo proste. Decyzja o wprowadzeniu fotonu może być oparta o wyjaśnienia podane na schemacie z rys. 2.

Zasady przyporządkowania parametrów fotonu wprowadzanego do fragmentu (wektor jednostkowy toru, energia, punkt wprowadzenia) podane w punkcie 8 niniejszego artykułu, są zgodne z zasadami opisanymi w pracy [3].

Wpłynęło do Redakcji 28.X.1968 r.

#### LITERATURA

- [1] Buslenko N.P. i inni: Metod statisticzeskich ispytanij, Gos. Izd. Fiziko-Mat. Litieratury, Moskwa 1962.
- [2] Goldstein H.: Osnowy zaszczyty reaktorow (tłum. z ang.), Gosatomizdat, Moskwa 1961.
- [3] Łukaszek W.: Analiza osłabienia promieniowania gamma przy pomocy obliczeń wykonanych metodą Monte-Carlo, praca doktorska, Promotor: Doc. dr n.t. Józef Szpilecki, Gliwice 1967 (nieopublikowana).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ О ОГРАНИЧЕНИИ АНАЛИЗА ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ  
В НЕОГРАНИЧЕННОЙ МАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Р е з ю м е

В предлагаемой работе дается сведения о модификации вычислений параметров биологической защиты с применением методов Монте-Карло. Рассматривается мононаправленное гамма излучение падающее ортогонально на поглощающий барьер. Существо модификации состоит в том, что она сводит анализ гамма-квантов к некоторому ограниченному пространственному элементу вырезанному из барьера. Влияние отбрасываемой части барьера компенсируется введением в пределы элемента так называемых внешних (введенных) гамма-квантов.

Устанавливаются условия, необходимые для введения внешнего гамма-кванта. Кроме того описывается правила подбора параметров вводимых (внешних) гамма-квантов.

THE PROPOSALS OF NARROWING THE GAMMA - RAYS ATTENUATION  
ANALYSIS IN THE INFINITE MATERIAL MEDIUM

S u m m a r y

In this paper the modification of calculation of the shield parameters by means of the Monte Carlo Method is given. The one direction gamma radiation is assumed to be normal to the infinite slab shield taken under consideration. The proposed modification reduce the sizes of the shield to some spatial part. The gamma-rays analysis is carried out in the limits of the separated part. The influence of the remain part of the shield is compensated by introducing into analysed part some, so called external (or introduced) fotons. The conditions that have to be accomplished to introduce an external foton are difined. Furthermore the rules of fitting the parameters for introduced fotons are given.

