

Janusz Adamski

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

## TRANSPORT NEUTRONÓW I FOTONÓW GAMMA W POWIETRZU

W pracy poddano analizie transport neutronów i fotonów gamma w powietrzu w ujęciu jednowymiarowym. Uwzględniono trzy rodzaje źródła promieniowania jądrowego. Przeanalizowano dawki pochłonięte w funkcji odległości od źródła. Wykonano porównanie wyników obliczeń własnych przy pomocy programu ANISN z wynikami obliczeń otrzymanymi przez kilku autorów.

### 1. WSTĘP

W badaniach nad skutkami wybuchów jądrowych, termojądrowych i pocisków neutronowych rozpatruje się zazwyczaj trzy rodzaje źródeł promieniowania jądrowego:

- a) źródło rozszczepieniowe [1],
- b) źródło termojądrowe [1],
- c) źródło neutronów monoenergetycznych 14 MeV.

Otrzymywane w wyniku badań numerycznych rozkłady energetyczne strumieni neutronów i fotonów gamma w powietrzu różnią się, gdyż autorzy stosują odmienne biblioteki danych jądrowych i różne widma energetyczne źródeł. W konsekwencji dotyczy to również podawanych dawek pochłoniętych w funkcji odległości od źródła. Niezależnie jednak od różnic ilościowych występują pewne prawidłowości spotykane prawie u wszystkich autorów, co zdaniem autora jest godne omówienia.

## 2. WIDMA ENERGETYCZNE STRUMIENIA NEUTRONÓW WYTWARZANE PRZEZ RÓŻNE TYPY ŹRÓDEŁ

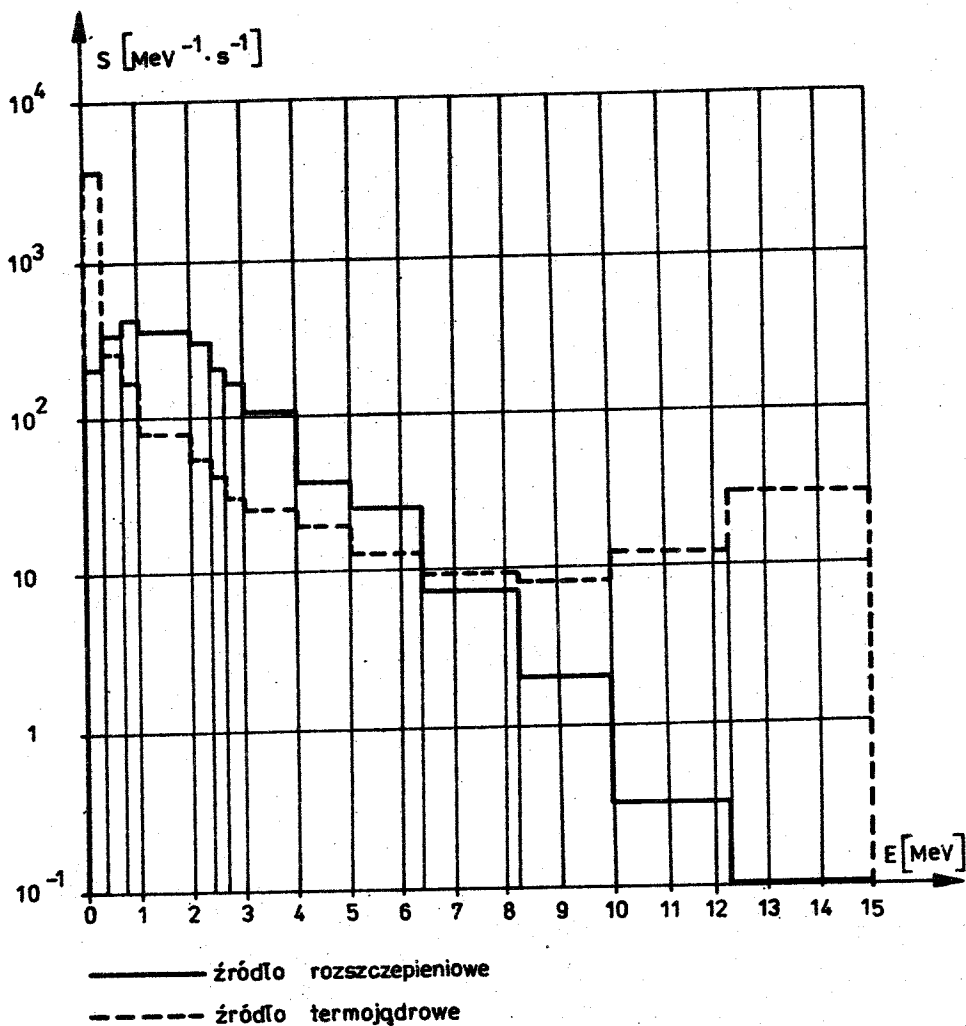
Pierwszym elementem niepewności podczas wyznaczania rozkładu energetycznego strumienia neutronów w powietrzu jest dosyć dowolne przyjmowanie kształtu widma neutronów źródła, gdyż brak jest wiarygodnych danych co do charakteru samego źródła. W przypadku analizy wybuchu jądrowego zakłada się zazwyczaj, iż jest to widmo odpowiadające widmu rozszczepieniowemu w reaktorach jądrowych. Większość autorów opracowań stosuje widmo podane w raporcie ORNL 4464 pokazane na rys.1, zawierające się w przedziale od około  $10^{-5}$  MeV do kilku MeV.

Dla wybuchu termojądrowego średniej mocy zakłada się zazwyczaj, iż widmo neutronów pierwotnych składa się z około 83% neutronów rozszczepieniowych i około 17% neutronów prędkich w przedziale energii od 12 do 16 MeV. Skład procentowy może ulegać zmianie w zależności od mocy wybuchu i konstrukcji bomby. Na rys.1 pokazano przyjmowane najczęściej widmo neutronów źródła termojądrowego [1]. Podczas obliczeń stosowano wyłącznie widma energetyczne zamieszczone w raporcie ORNL-4464 [1].

Wybór biblioteki przekrojów czynnych oraz metody obliczeń stanowi drugie źródło niepewności w ocenie rozkładu energetycznego strumienia neutronów w powietrzu. Podczas obliczeń korzystano z biblioteki danych jądrowych CASK IV dla 22 grup energii neutronów i 18 grup energii fotonów gamma.

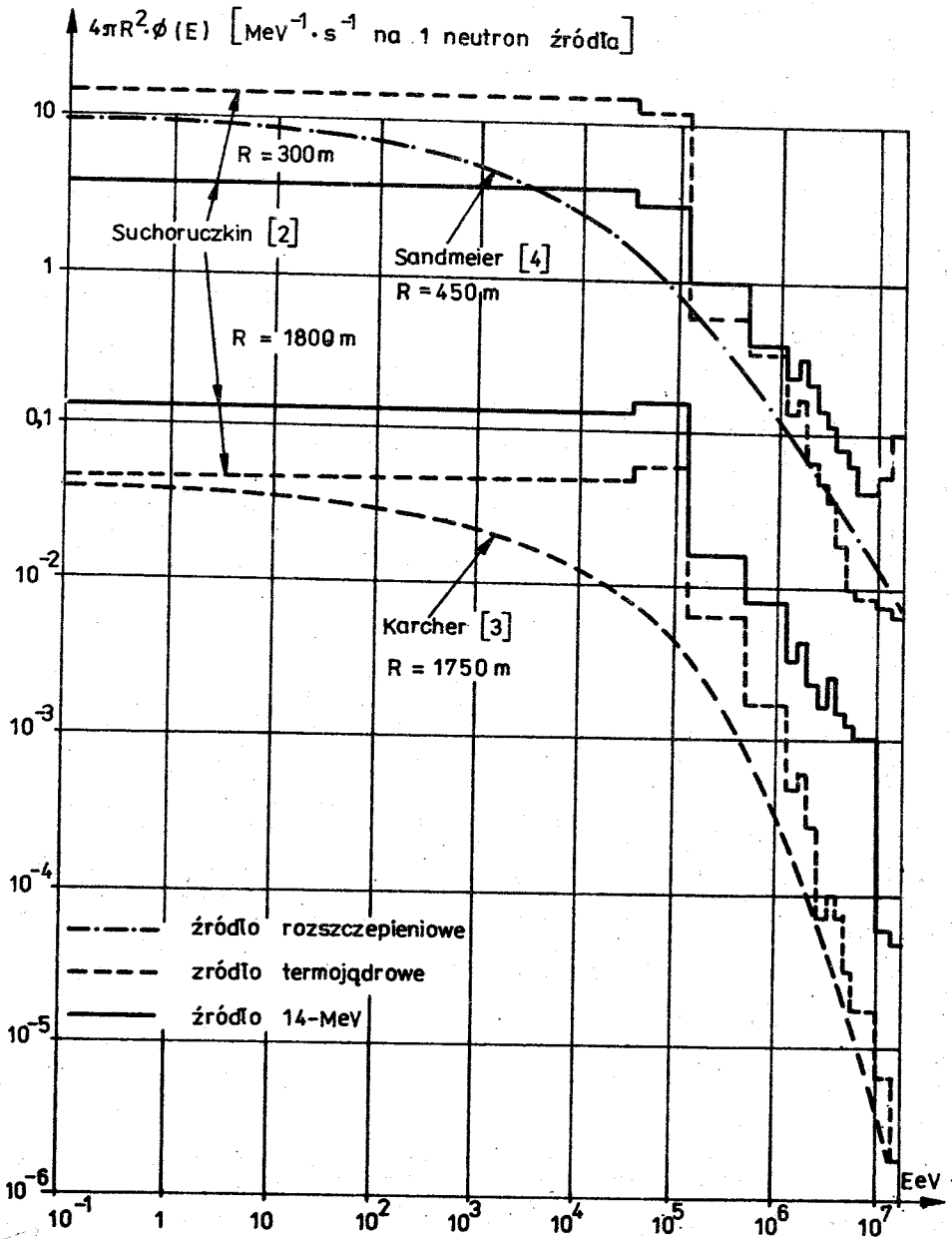
Do obliczeń rozkładu energetycznego strumienia neutronów i fotonów gamma w powietrzu wykorzystano jednowymiarowy program ANISN [6]. Wyniki obliczeń porównano z danymi publikowanymi w literaturze przez kilku autorów.

Na rys.2 pokazano widmo energetyczne strumienia neutronów, pochodzące od trzech rodzajów źródeł neutronów, uzyskane przez Suchoruczkiną [2], Sandmeiera [4] i Karchera [3] dla różnych odległości od źródła. Jak widać na odległości około 300 m od źródła neutronów do energii około  $10^5$  eV przeważa strumień neutronów pochodzący od źródła termojądrowego, dla



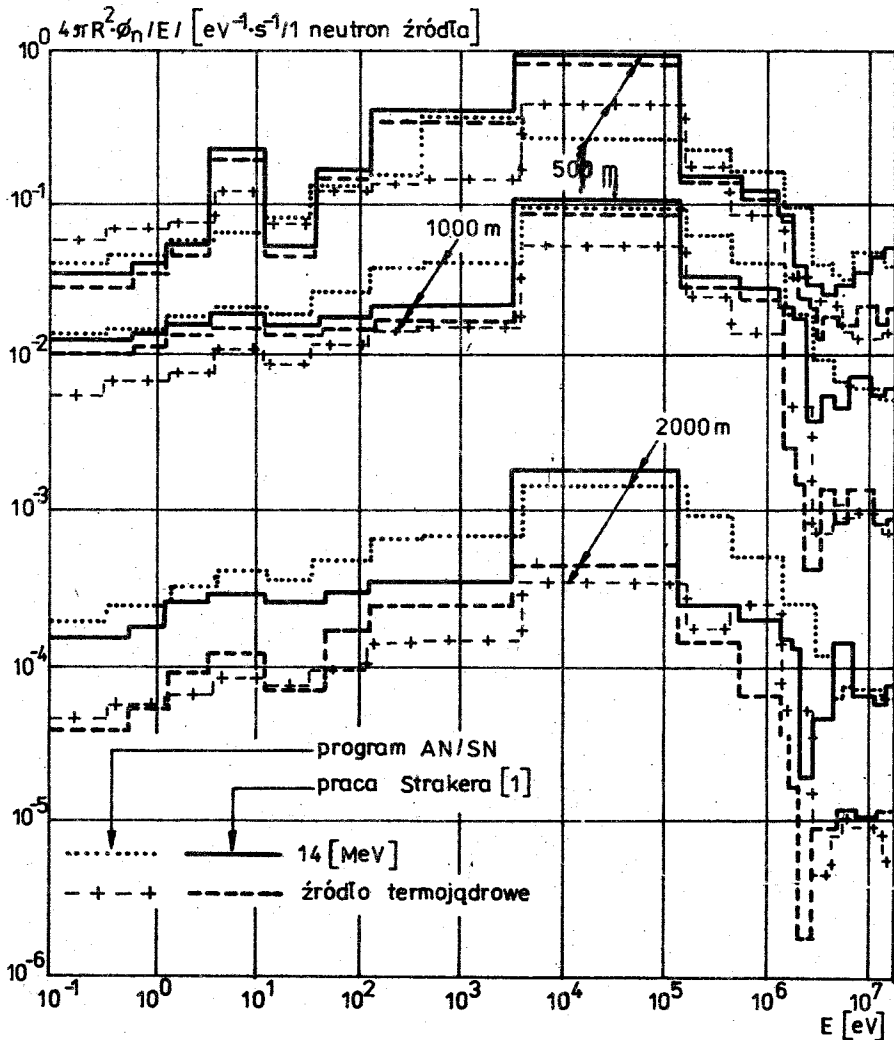
Rys.1. Widmo neutronów źródła rozszczepieniowego i termojądrowego według ORNL-4464 [1]

energii powyżej  $10^5$  eV zaczyna przeważać strumień pochodzący od źródła 14 MeV. W odległości około 1800 m od źródła w całym zakresie energii przeważa strumień neutronów pochodzący od źródła 14 MeV. Neutrony pochodzące ze źródła 14 MeV muszą przebyć pewną drogę w powietrzu by ulec spowolnieniu, stąd udział neutronów o niewielkiej energii w strumieniu w pobliżu



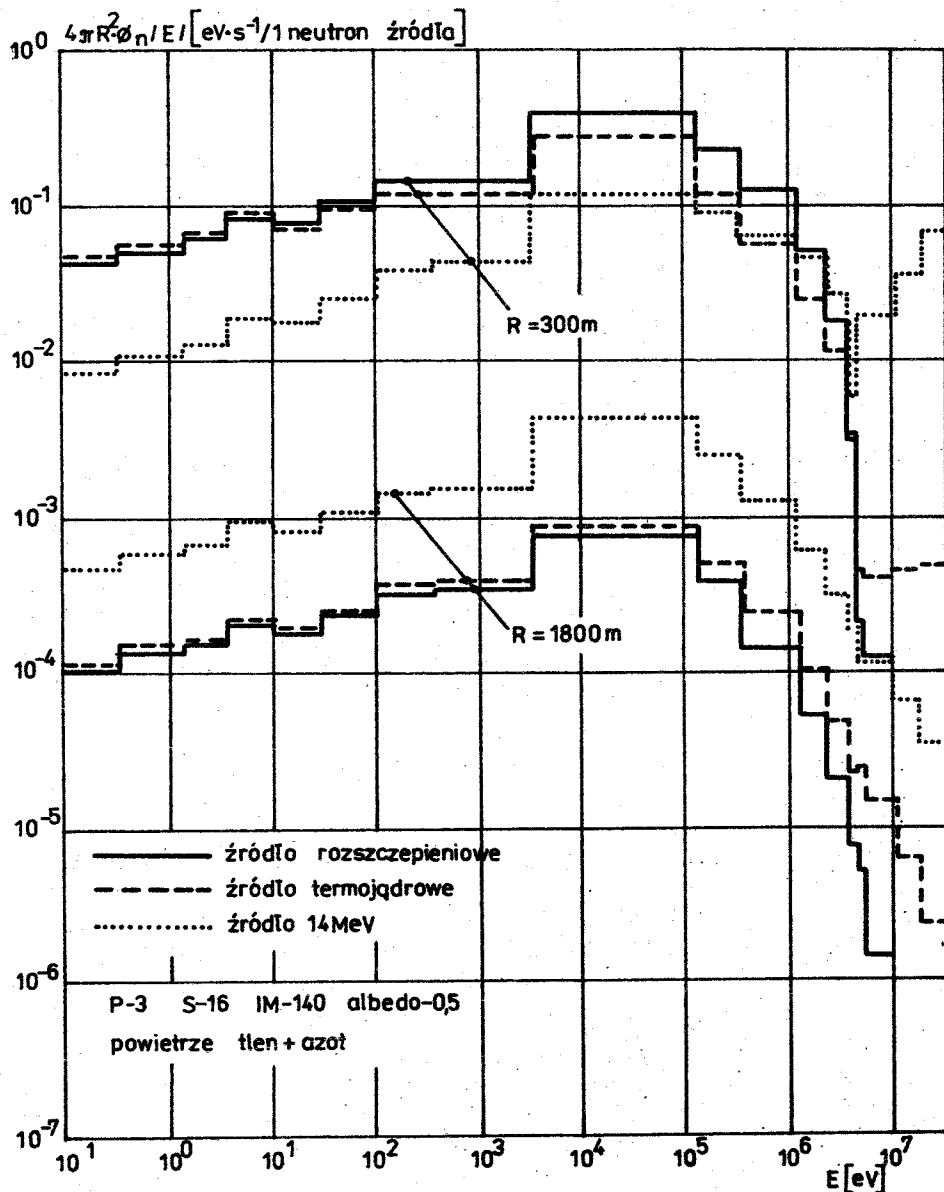
Rys.2. Widmo neutronów w powietrzu dla różnych odległości od źródła

źródła jest mniejszy od udziału wnoszonego przez źródło termojądrowe i rozszczepieniowe, które emitują neutrony o różnych energiach.



Rys.3. Widmo neutronów w powietrzu dla różnych odległości od źródła. Według Strakera [1] ORNL-4464. Neutrony pochodzące ze źródła 14 MeV i termojądrowego. Porównanie wyników obliczeń programem ANISN z wynikami podanymi przez Strakera w raporcie ORNL 4464

Na rys.3 i rys.4 przedstawiono wyniki obliczeń przy pomocy programu ANISN i wyniki obliczeń uzyskane przez Strakera



Rys.4. Widmo neutronów w powietrzu dla różnych odległości od źródła. Program ANISN [6]

[1]. Porównano widmo energetyczne strumienia neutronów dla trzech różnych odległości od źródła termojądrowego i źródła 14 MeV. Do obliczeń przyjęto widmo neutronów źródła termoją-

drowego z raportu ORNL-4464. Jak widać uzyskano dobrą zgodność wyników w stosunku do obliczeń Strakera. Obliczenia przeprowadzono w przybliżeniu P-3 dla  $S_{16}$ , 140 stref, współczynnika odbicia 0,5 i mieszaniny tlenu z azotem. Dla trzech odległości od źródła 500 m, 1000 m i 2000 m występuje wyraźne maksimum strumienia neutronów leżące w zakresie energii od  $5 \cdot 10^3$  do  $10^5$  eV. Występuje również podana uprzednio prawidłowość, iż w pobliżu źródła, w zakresie niższych energii, przeważają neutrony pochodzące od źródła termojądrowego, Niemnie w odległości większej aniżeli 500 m przeważa wyraźnie strumień pochodzący od źródła 14 MeV i to dla całego zakresu energii neutronów.

### 3. OCENA WIELKOŚCI DAWEK POCHŁONIĘTYCH I DAWEK BIOLOGICZNYCH

Dawki pochłonięte wyznacza się z zależności

$$D(r) = \sum_{i=1}^N D_i(r) = \sum_{i=1}^N \phi_i(E) G_i ,$$

gdzie:

$\phi_i(E)$  - strumień neutronów w grupie i-tej w odległości  $r$  od źródła,

$G_i$  - współczynnik przeliczeniowy dawki pochłoniętej dla grupy i-tej,

$D_i(r)$  - dawka pochłonięta w odległości  $r$  w grupie i-tej.

Dawka pochłonięta w odległości  $r$  od źródła jest sumą dawek grupowych.

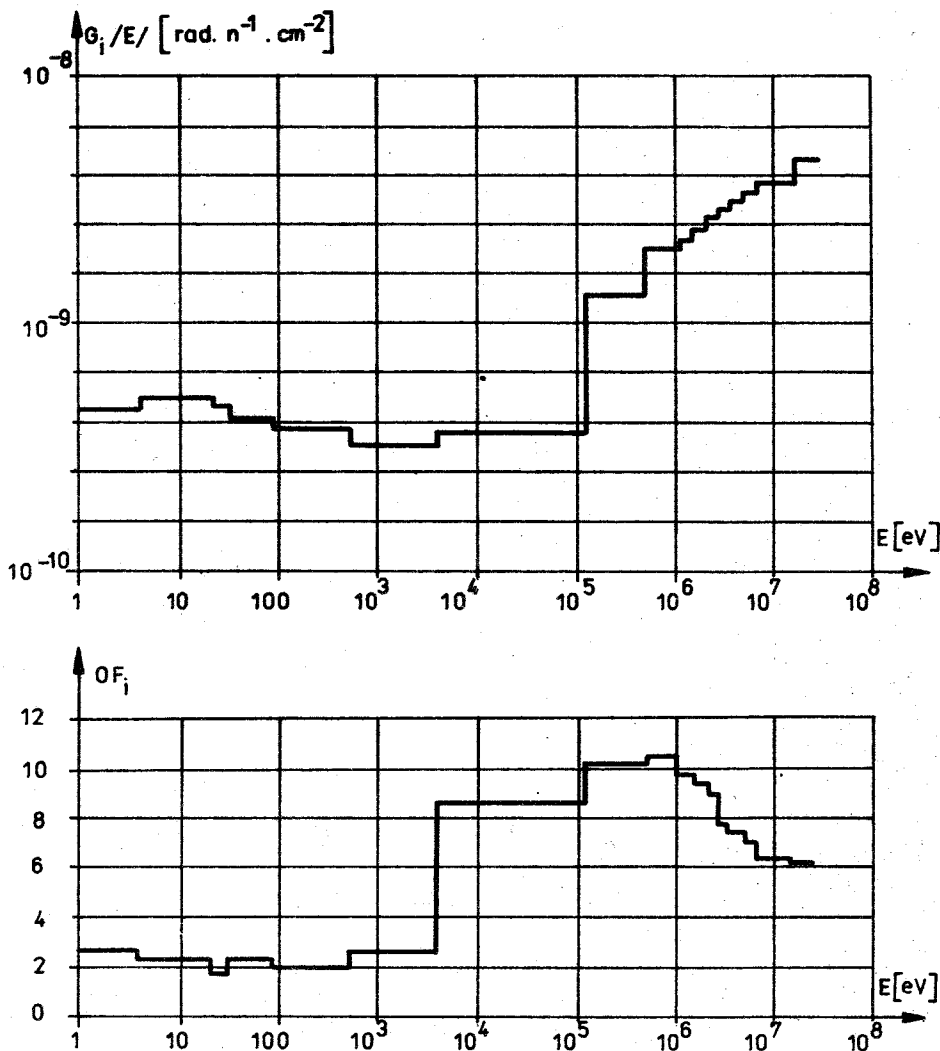
Podobnie dawkę biologiczną w odległości  $r$  od źródła wyznacza się z zależności

$$D^B(r) = \sum_{i=1}^N D_i(r) QF_i ,$$

gdzie

$QF_i$  oznacza współczynnik przeliczeniowy dawki biologicznej w grupie i-tej

Dokładność wyznaczania dawek zależy zatem od dokładności z jaką jesteśmy w stanie wyznaczyć strumień neutronów w danej grupie energii oraz od przyjętych współczynników przeliczeniowych dawek. W tabelicy 1 zestawiono współczynniki przeliczeniowe dawek dla 22 grup energii neutronów stosowane przez Hendersona [8] i Auxier-Snydera [7], a na rys.5 pokazano zmianę dawek w funkcji energii. W obliczeniach dawek skorzy-



Rys.5. Wartości współczynników przeliczeniowych dawki  $G_i$  i  $OF_i$  w funkcji energii. Według Auxiera - Snydera [7] dla 22 grup energii neutronów



Tablica 1

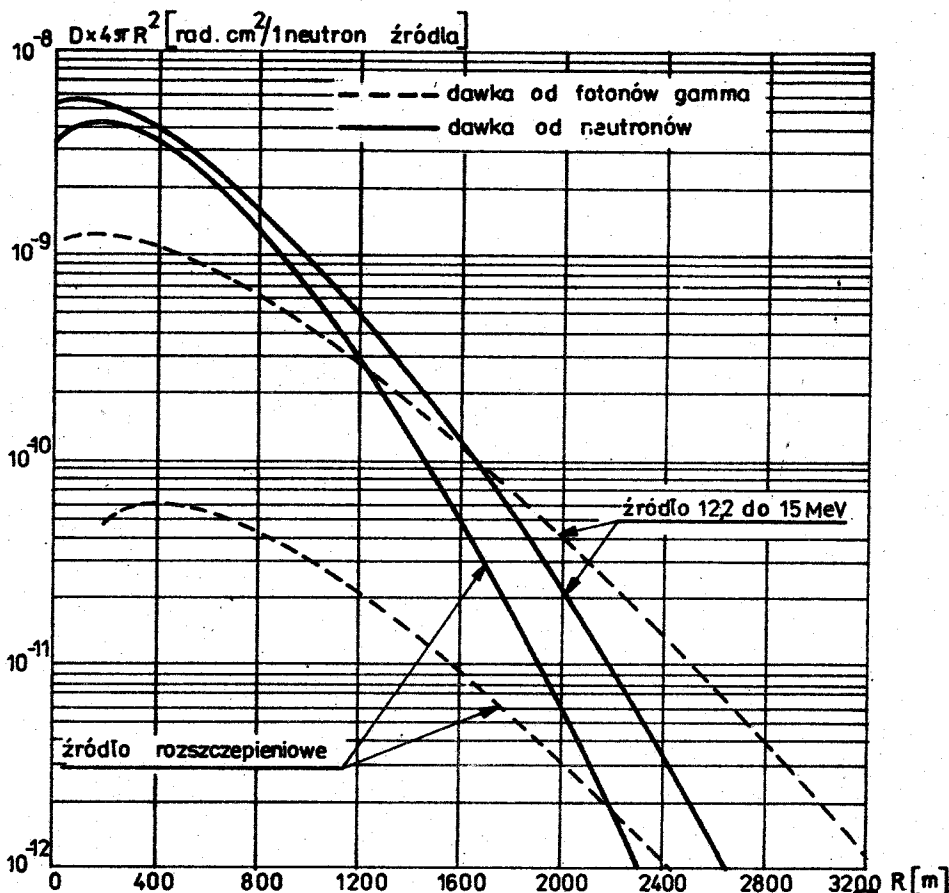
Wartości współczynników przeliczeniowych dawki oraz współczynników QF dla neutronów

Nr grupy neutronów	Górny zakres energii [eV]	Współczynnik przeliczeniowy dawki [ $\text{rad}\cdot\text{n}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]		QF
		Henderson [8]	Auxier-Snyder [7]	
1	15,00 +6	5,46 -9	7,61 -9	6,0
2	12,20 +6	5,13 -9	6,68 -9	6,3
3	10,00 +6	4,48 -9	6,16 -9	6,5
4	8,18 +6	4,61 -9	5,87 -9	6,6
5	6,36 +6	4,44 -9	5,56 -9	6,8
6	4,96 +6	4,13 -9	5,15 -9	7,0
7	4,06 +6	4,01 -9	4,55 -9	7,4
8	3,01 +6	3,39 -9	4,03 -9	7,9
9	2,46 +6	3,15 -9	3,83 -9	8,6
10	2,35 +6	3,09 -9	3,74 -9	9,0
11	1,83 +6	2,64 -9	3,52 -9	9,7
12	1,11 +6	1,97 -9	2,92 -9	10,5
13	5,50 +5	1,12 -9	1,47 -9	10,1
14	1,11 +5	2,29 -10	5,21 -10	8,3
15	3,35 +3	0,00	4,95 -10	2,3
16	5,83 +2	0,00	5,57 -10	2,0
17	1,01 +2	0,00	5,96 -10	2,4
18	2,90 +1	0,00	6,21 -10	2,1
19	1,07 +1	0,00	6,34 -10	2,4
20	3,06	0,00	6,30 -10	2,6
21	1,12	0,00	6,07 -10	2,8
22	0,414	0,00	5,31 -10	3,0

stano ze współczynników przeliczeniowych podanych przez Auxier-Snydera, co pozwala porównać wyniki własnych obliczeń z wynikami podanymi przez Strakera [5].

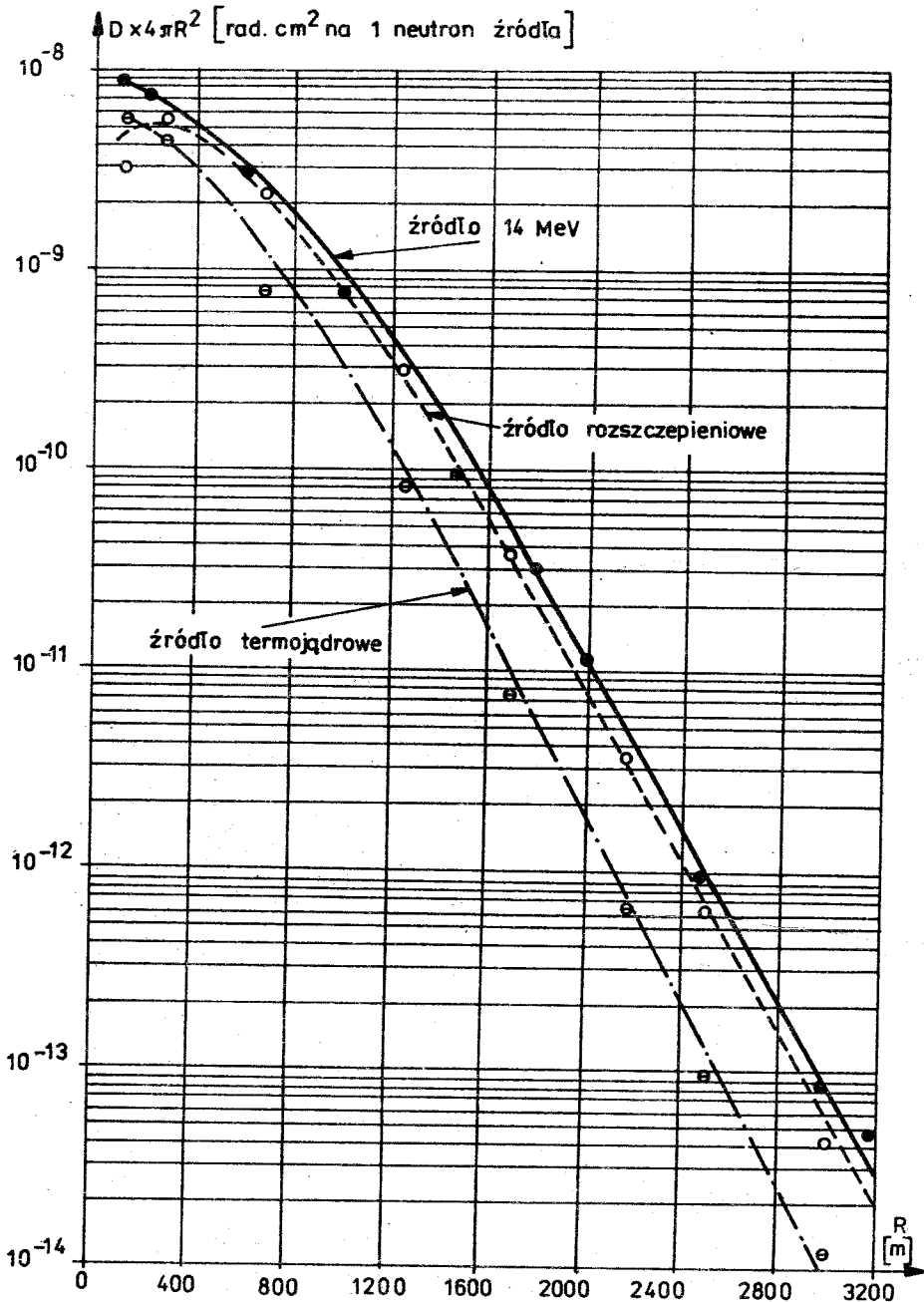
Na rys.6 podano wyniki uzyskane przez Strakera dla dwóch rodzajów źródeł. Jak widać dawki pochodzące od źródła 14 MeV

są wyższe w całym zakresie odległości od źródła w porównaniu z dawkami pochodzącymi od źródła rozszczepieniowego. Dotyczy to dawek pochodzących od neutronów, jak i fotonów gamma.

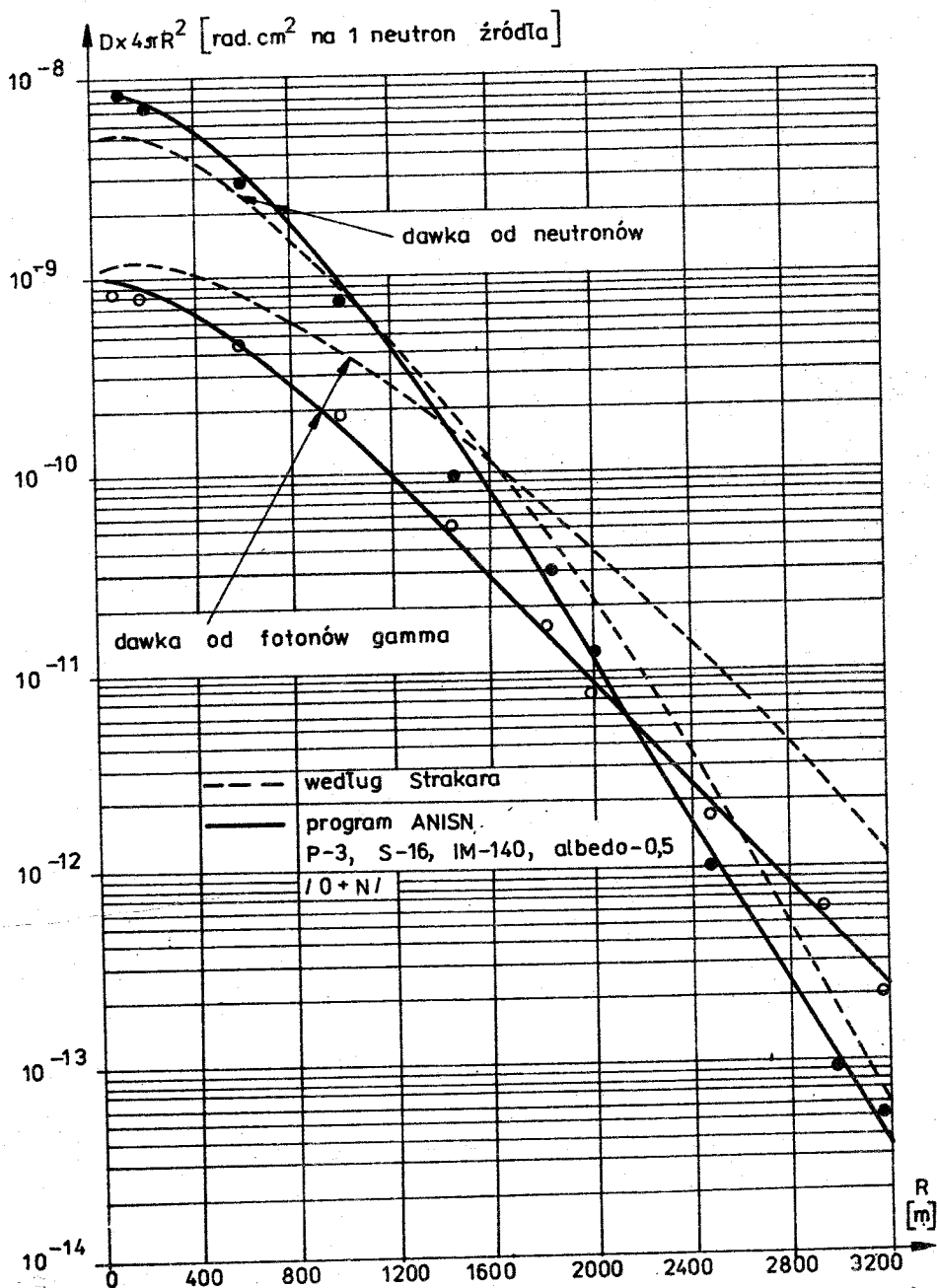


Rys.6. Zależność dawki pochłoniętej od odległości dla neutronów i fotonów gamma. Źródło rozszczepieniowe i źródło 14 MeV. Ośrodek nieskończony powietrze. Według Strakera [5]

Obserwuje się również następną prawidłowość. W przypadku źródła 14 MeV do odległości od źródła około 1600 m przeważa dawka pochodząca od neutronów, natomiast w dalszych odległościach od źródła przeważa dawka pochodząca od fotonów gamma. W przypadku źródła rozszczepieniowego obserwuje się tę samą prawidłowość, z tym że odległość, na której zaczyna przeważać dawka od fotonów gamma wynosi około 2300 m.



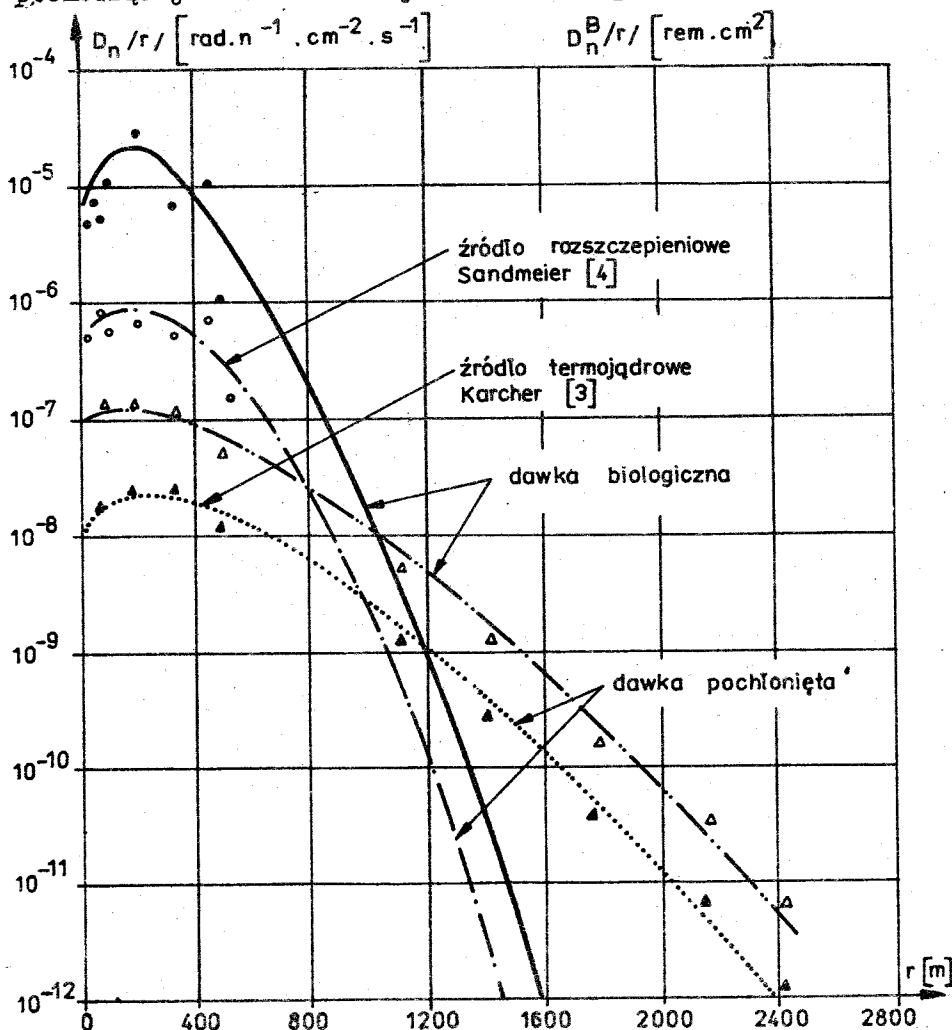
Rys.7. Zależność dawki pochłoniętej od odległości dla neutronów. Program ANISN, P-3, S-16, IM-140, albedo=0,5, (O + N)



Rys.8. Zależność dawki pochłoniętej dla neutronów i promieniowania gamma, źródło 14-MeV

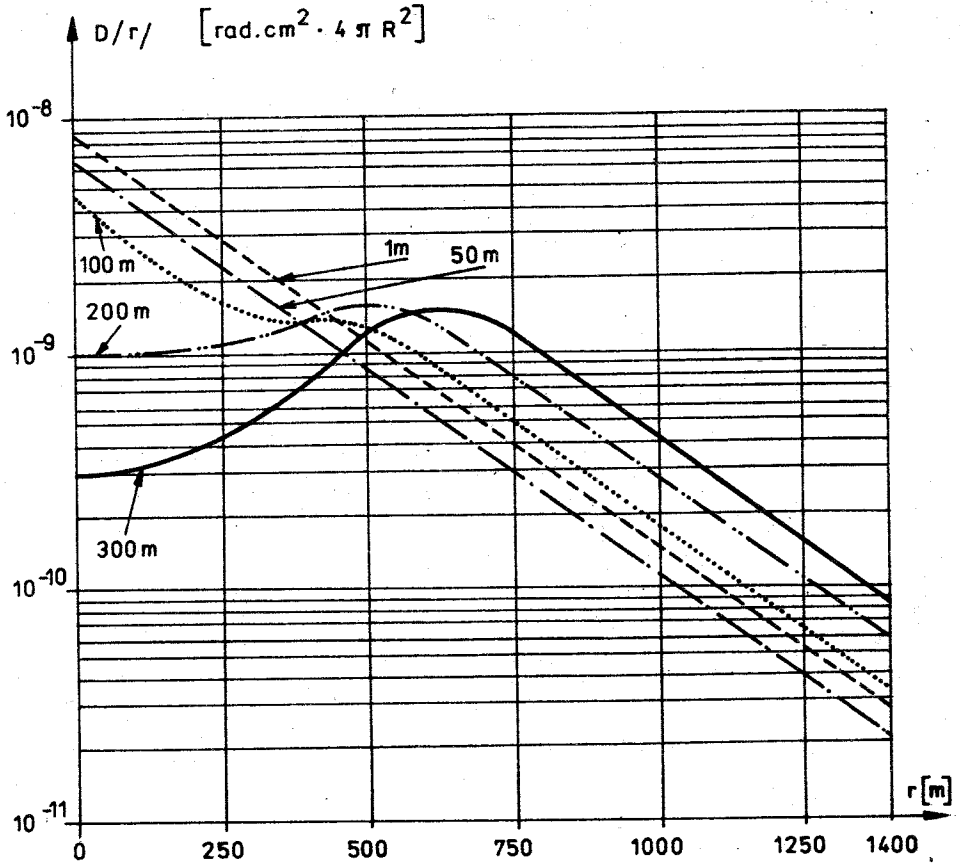
Na rys.7 pokazano wyniki własnych obliczeń dawki pochłoniętej dla trzech rodzajów źródeł. Przedstawiono dawki pochłonięte w funkcji odległości od źródła pochodzące od neutronów. Jak widać uzyskano dobrą zgodność wyników w porównaniu do wyników uzyskanych przez Strakera.

Na rys.8 porównano dla przypadku źródła 14 MeV wyniki własnych obliczeń z wynikami otrzymanymi przez Strakera. Jak widać wyniki są porównywalne i to zarówno dla przypadku dawki pochodzącej od neutronów jak i fotonów gamma.



Rys.9. Zależność dawki pochłoniętej i dawki biologicznej od odległości. Według [3] i [4]

Na rys.9 przedstawiono dawki pochłonięte i dawki biologiczne otrzymane przez Karchera i Sandmeiera dla źródła termojądrowego i źródła rozszczepieniowego. Widać wyraźne różnice w wielkościach dawek w porównaniu do wyników Strakera i własnych obliczeń. Głównym powodem niezgodności jest stosowanie przez tych autorów przestarzałych bibliotek danych jądrowych oraz trochę innych widm źródeł neutronów.



Rys.10. Dawka pochodząca od neutronów wysyłanych przez źródło o energii 14 MeV umieszczone na różnych wysokościach. Według J.U.Pace. ORNL-TM-4841, sierpień 1975 rok [7]

Wielkość dawki zależy w wyraźny sposób od wysokości umieszczenia źródła nad powierzchnią ziemi. Z badań prowadzonych między innymi przez J.U.Pace [7] wynika, iż w zakresie odległości

od źródła do około 550 m największą dawkę otrzymuje się dla źródła umieszczonego najniżej, a dla odległości większych od 550 m największą dawkę uzyskuje się dla przypadku źródła umieszczonego na wysokości około 300 m. Wyniki uzyskane przez J.U.Pace przedstawiono na rysunku 10.

Należy dodać, iż w celu ułatwienia analizy wyników ujednotwiono skalę odległości oraz skalę energii. Wszystkie dawki odniesiono do źródła emitującego jeden neutron i przemnożono przez  $4\pi R^2$ . Wszędzie tam, gdzie zachodziła konieczność dokonano niezbędnych przeliczeń wyników zamieszczonych w literaturze.

#### 4. WNIOSKI

Porównanie wyników badań numerycznych, prowadzonych w różnych ośrodkach, pozwala na sformułowanie pewnych wniosków. W zakresie odległości od źródła neutronów do około 500 m przebiega strumień pochodzący od źródła rozszczepieniowego, natomiast na dalszych odległościach strumień pochodzący od źródła termojądrowego i źródła monoenergetycznego neutronów o energii 14 MeV.

Wyznaczanie dawek w funkcji odległości od źródła neutronów obarczone jest trudnym do oszacowania błędem, gdyż zależy od przyjętych współczynników przeliczeniowych dawek, które podawane są różnie przez szereg autorów.

Analiza wyników badań numerycznych uzyskanych w szeregu ośrodkach upoważnia do mniemania, iż najbardziej pesymistyczne wyniki otrzymuje się dla przypadku monoenergetycznego źródła neutronów o energii 14 MeV.

Wyznaczanie dawek biologicznych ma charakter obliczeń szacunkowych. Stosowane współczynniki przeliczeniowe dawki biologicznej  $QF$  są słabą funkcją energii i stąd na wykresie krzywe obrazujące zmianę dawki biologicznej w funkcji odległości od źródła posiadają taki sam charakter jak krzywe dawki pochłoniętej. Wystarczy zatem te ostatnie mnożyć na przykład przez 8 i przyjąć stąd wielkość dawki biologicznej.

Wielkość dawki zależy w sposób wyraźny od wysokości umieszczenia źródła nad powierzchnią ziemi w zakresie odległości od źródła do około 550 m.

Wyniki wszystkich obliczeń zależą w istotny sposób od stosowanych bibliotek danych jądrowych i od przyjętych widm energetycznych źródeł neutronów.

Niezwykle cenna byłaby doświadczalna weryfikacja badań numerycznych na przykład przy pomocy źródła monoenergetycznych neutronów o energii 14 MeV.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Straker E.A., Gritzner M.L.: Neutron and Secondary Gamma-Ray Transport in Infinite Homogenous Air. ORNL-4464, 1969.
- [2] Suchoruczkin A.K., Kuchtiwicz W.I., Trubnikov A.I.: Zawisimost ugłowego raspredelenia ot wremieni dla impulsnogo isto cznika gamma izluczenia. Radiaconnaja bezopastność i zaszcita A.E.S. Atomizdat 1975.
- [3] Karcher A.H.: Neutron Air-Transport Data for the Design of Protective Structures. N.S.E. pp 367 do 487. 1967.
- [4] Sandmeier H.A.: Electromagnetic Pulse and Explosion. N.S.E. Vol. 48, pp. 343 do 355. 1972.
- [5] Straker E.A.: The Effect of the Ground on the Steady-State and Time-Dependent Transport of Neutrons and Secondary Gamma Rays in the Atmosphere. N.S.E. Vol. 46 pp. 334 do 355. 1971.
- [6] ANISN-W. Multigroup one Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering. ORNL-CCC-255.
- [7] Pace J.V. i inni: Neutron and Secondary Gamma-Ray Transport Calculations for 14 MeV and Fission Neutron Sources in Air-Over Ground and Air-Over Seawater Geometries. ORNL-TM-4841. August 1975.
- [8] Straker E.A.: Investigation of Adequacy of Nitrogen Cross Section Sets Comparison of Neutron Secondary Gamma-Ray Transport Calculations with Integral Experiments. ORNL-TM-3768. August 1972.
- [9] Provenzano T.G.: Feasibility Study: Intense 14 MeV Neutron Source for Operation Henre. CEX-65.01. May 1966.



**ТРАНСПОРТ НЕЙТРОНОВ И ГАММА - ФОТОНОВ В ВОЗДУХЕ****К р а т к о е   с о д е р ж а н и е**

В работе приводятся результаты одномерного анализа транспорта нейтронов и гамма-фотонов в воздухе. Рассматриваются три различные типы источников ядерного излучения. Проводится анализ поглощенной дозы в зависимости от расстояния от источников излучения. Проводится сравнение полученных автором результатов вычислений, осуществленных при использовании программы ANISN, с результатами вычислений, полученных другими авторами.

**THE TRANSPORT OF NEUTRONS AND GAMMA - RAYS IN THE AIR****S u m m a r y**

The transport of neutrons and gamma rays in the infinite homogenous air has been investigated. For the calculations has been used the Multigroup One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code ANISN-W. The calculations has been performed for three types of neutrons sources. The neutrons and gamma rays doses in the air has been analyzed, and comparison to the others authors results has been given.

Rękopis dostarczone w grudniu 1980 r.