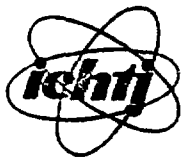


INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ
INSTITUTE OF NUCLEAR CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ХИМИИ И ТЕХНИКИ



INCT-2092/VII/C/B

**WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE ŹRÓDEŁ
DO OBRÓBKİ RADIACYJNEJ**

Z.P. Zagórski

Warszawa 1990

**INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ
ZAKŁAD CHEMII I TECHNIKI RADIACYJNEJ**

**WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE ŹRÓDEŁ DO OBRÓBK
RADIACYJNEJ**

**TECHNOLOGICAL YIELDS OF SOURCES FOR RADIATION
PROCESSING**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННО
ОБРАБОТКИ**

Z.P. Zagórski

**Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
Zakład Chemii i Techniki Radiacyjnej
ul.Dorodna 16, 03-195 Warszawa**

Warszawa 1990

KOMISJA REDAKCYJNA

Wiktor Smulek (przewodniczący), Jerzy Narbutt (zastępca przewodniczącego), Barbara Andrzejak, Antoni Dancewicz, Bronisław Machaj, Ewa Milner, Tadeusz Urbański, Ewa Godlewska (sekretarz)

OPINIODAWCY

prof.dr Przemysław Hoffmann
prof.dr inż. Władysław Pekala

OPRACOWANIE GRAFICZNE

Stanisław Tyborowski

INSTYTUT WYDAWNICZY ZWIĄZKÓW ZAWODOWYCH

Redakcja Wydawnictw Zleconych
Warszawa 1990

Wydano na zlecenie
Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej

Nakład 50+15 egz. Format B5. Objętość:
2,5 ark. wyd. i 2,666/A5 ark. druk.
Papier offsetowy, kl. III, 70 g/m², B3
Materiały przekazano do dr u 9 XI 1990 r.
Druk ukończono 20 XI 1990 r.
Nr prod. RWZ/35/ZW/21/90. Zam. druk. 468/90

Powielarnia ZG ZNP

Wydażności technologiczne źródeł do obróbki radiacyjnej

Raport przeznaczony jest dla osób planujących obróbkę radiacyjną dowolnego materiału. Źródła z kobaltem-60 potraktowane są pobieżnie, ponieważ instalacji o liczącej się technologicznie aktywności do roku 2000 w Polsce najprawdopodobniej nie będzie. Obliczenia koncentrują się na akceleratorach elektronów, podzielonych na dwie grupy: liniaków o energii elektronów do 13 MeV, o dobrej uniwersalności i akceleratorów o energiach poniżej 2 MeV, bardziej wydajnych energetycznie lecz o ograniczonych zastosowaniach. Przedstawione obliczenia są w dużej mierze konfrontacją założeń autora, które doprowadziły do konstrukcji i eksploatacji akceleratora LAR 13/9. Założenia i studia przeprowadzone w drugiej połowie lat sześćdziesiątych wykazały swą słuszność w następnych 20 latach. Należy zdawać sobie sprawę, że z włożonej mocy elektrycznej 150 kW otrzymuje się na transporterze zaledwie około 5 kW wiązki odchylonej i przemiatanej. Wykorzystanie tej mocy do wytworzenia przemian indukowanych promieniowaniem ogranicza się do kilku procent z powodu konieczności spełnienia wymogu narzuconej jednorodności dawki, sposobu przygotowania obiektu obróbki i jego efektywnej grubości, strat na skrajach przemiataania i pomiedzy skrzynkami, oraz strat na martwy czas strojenia i dozymetrii. Ekonomia pracy akceleratorów o mniejszej energii może być dla określonych optymalnych obiektów obróbki lepsza niż dla liniaków. Już w pierwszej fazie, tzn. zamiany energii elektrycznej z sieci na energię wiązki elektronowej wydajność jest 2-3 krotnie lepsza niż w przypadku liniaka. Zwrócono uwagę na wydajności technologiczne w przypadku konwersji wiązki elektronowej na przenikliwe promieniowanie hamowania, podobne do gamma. Podkreślono zalety technologii, które dopuszczają możliwość regulacji kształtu obiektu obróbki. Wyliczono 10 parametrów, które muszą być znane dla obliczenia wydajności technologicznej obróbki radiacyjnej oraz dodatkowe okoliczności, które muszą być uwzględnione przy porównaniach kosztów obróbki radiacyjnej z innymi procesami i operacjami dającymi te same efekty. Jest to niekiedy możliwe, np. w przypadku sterylizacji radiacyjnej i termicznej. Zwrócono uwagę również na aspekty ekologiczne obróbki radiacyjnej.

Technological yields of sources for radiation processing

The present report is prepared for planners of radiation processing of any material. Sources with cobalt-60 are treated marginally, because, most probably, there will be no installation of technically meaningful activity in Poland before the year 2000. Calculations are focused on accelerators of electrons, divided into two groups: versatile linacs of energy up to 13 MeV, and accelerators of lower energy, below 2 MeV, of better energetic yield but of limited applications. The calculations are connected with the confrontation of the author's technological expectations during the preparation of the linac project in the late '60s, with the results of twenty years of exploitation of the machine. One has to realize that from the 150 kW input power from the mains, only 5 kW of bent and scanned beam is recovered on the conveyor. That power is only partially used for radiation induced phenomena, sometimes only a few percent, because of the demanded homogeneity of the dose, of the mode of packing of the object and its shape, of losses at the edges of the scanned area and in the spaces between boxes, and of losses during the dead time due to the tuning of the machine and dosimetric operations. The use of lower energy accelerators may be more economical than that of linacs in case of objects of optimum type. At the first stage already, that is of the conversion of electrical power into that of the low energy electron beam, the yield is 2-3 times better than in the case of linacs. Attention has been paid to the technological aspects of electron beam conversion into the more penetrating bremsstrahlung similar to gamma radiation. The advantages of these technologies, which make it possible to control the shape of the processed object are stressed. The author lists ten parameters necessary for a proper calculation of technological yields of radiation processing. Additional conditions which must be taken into account in the comparison of the cost of radiation processing with the cost of other technologies which have the same effect, e.g. thermal sterilization, are also discussed. Attention is drawn to the ecological aspects of radiation processing.

Технологическая эффективность источников
для радиационной обработки

Отчёт предназначен для тех, которые планируют радиационную обработку любых материалов. Источники основанные на применении изотопа Co-60 рассматриваются лишь поверхностно, поскольку по всей вероятности до 2000 года в Польше не будет установки с активностью, подходящей для технологических целей. Расчеты относятся к ускорителям электронов, которые разделены на две группы: универсальные линейные ускорители с энергиями электронов до 13 МэВ и ускорители с энергиями ниже 2 МэВ, более эффективные с точки зрения энергетической эффективности, но применение которых ограничено. Представленные расчеты являются в большой мере сопоставлением предположений автора, которые привели к построению и эксплуатации ускорителя LAE I3/9. Эти предположения из второй половины шестидесятых годов подтвердились в течение последующих 20 лет. Необходимо иметь ввиду, что из вкладываемой электрической мощности равной 150 кВт получается на транспортере лишь около 5 кВт мощности в виде отклоняемого и сканируемого пучка. Использование этой мощности для образования радиационно стимулированных изменений ограничено до нескольких процентов ввиду необходимости удовлетворения требованиям однородности распределения дозы, условиям приготовления образцов и ограничениям их эффективной толщины, из-за потерей в крайних положениях пучка и в положениях между коробками, а также потерей на время настройки устройства и дозиметрические измерения. Экономические эффекты применения ускорителей с меньшей энергией могут быть лучшие для определенных облучаемых объектов, чем в случае линейных ускорителей. Уже на первом этапе, при преобразовании электрической энергии из сети в энергию электронного пучка, их эффективность на 2-3 раза лучше, чем в случае линейных ускорителей. Уделено внимание технологической эффективности преобразования электронного пучка на проникающее тормозное излучение, похоже на гамма-излучение. Подчеркнуты достоинства технологии, которые разрешают возможность регуляции формы объекта облучения. Указаны 10 параметров, которые необходимо учитывать для

расчета технологической эффективности радиационной обработки, а также дополнительные обстоятельства, которые должны быть учтены при сравнении стоимости радиационной обработки с другими процессами и операциями приводящими к таким же результатам. Это сравнение иногда возможно, например в случае радиационной и термической стерилизации. Обращено внимание на экологические вопросы радиационной обработки.

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	9
2. WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE ŹRÓDEŁ GAMMA	10
3. ŹRÓDŁA AKCELERATOROWE DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ	11
3.1. AKCELERATORY LINIOWE	12
3.2. TEORETYCZNA I RZECZYWISTA WYDAJNOŚĆ LINIOWEGO AKCELERATORA ELEKTRONÓW	15
3.3. AKCELERATORY ELEKTRONÓW PONIŻEJ ENERGII 2 MeV I MOCY DZIESIĄTEK KILOWATÓW W WIĄZCE	23
4. KONWERSJA WIĄZKI ELEKTRONOWEJ NA ELEKTROMAGNETYCZNE PROMIENIOWANIE X (HAMOWANIA)	24
5. NIEKTÓRE DODATKOWE ASPEKTY TECHNOLOGICZNE	27
6. WNIOSKI I REGUŁY OCENY WYDAJNOŚCI OBRÓBKI RADIACYJNEJ	28
7. LITERATURA	31

1. WSTĘP

W raporcie omówiono realne wydajności wielkich źródeł promieniowania jonizującego stosowanych do obróbki radiacyjnej. Przyjęło się we wszystkich językach podkreślanie właśnie określenie "wielki", gdyż tylko duże ilości energii promieniowania, równoważne tym jakie dają tony radu, mogą dać skutki znaczące ekonomicznie. Promieniowanie jonizujące jest mierzalne już w nieznacznych ilościach, bo uruchamia czułe detektory i liczniki. Czułość tych urządzeń polega na celowym wykorzystaniu zjawisk powielających, na przykład lawinowego zwiększenia liczby jonów w gazie lub wywoływania chemicznego emulacji fotograficznej. A więc niewiele energii promieniowania jonizującego potrzeba, żeby zastosować je jako wskaźnik, natomiast promieniowanie jonizujące jest bardzo mało efektywne, gdy chodzi o wywołanie znaczących zmian chemicznych, jeżeli nie są one powielane jak w reakcjach polimeryzacji. Te drobne ilościowo zmiany są jednak specyficzne i istotne; dla nich właśnie uruchamia się kosztowny aparat obróbki radiacyjnej.

Pod wielkim źródłem rozumiemy instalację gamma, najczęściej z kobaltem-60 o łącznej aktywności większej niż 1,85 PBq (czyli 50 kCi), oraz instalacje akceleratorowe wytwarzające elektrony przyspieszone o mocy wiązki większej niż 1 kW. Są to cezwry umowne, które zaproponowano na 7th International Meeting on Radiation Processing (Siódma Międzynarodowa Konferencja Obróbki Radiacyjnej w roku 1989) i które zostały przyjęte bez protestów dla oceny potencjału produkcyjnego poszczególnych państw. Ustalenie tych granic jest konieczne, by nie obciążać tabel badawczymi źródłami laboratoryjnymi, które są potrzebne dla postępu, lecz są bez znaczenia dla produkcji [1].

Pierwszą grupą - źródłami izotopowymi zajmować się będziemy krótko, ponieważ w Polsce nie ma w tej chwili ani jednego źródła o takiej aktywności i najprawdopodobnie do roku 2000 nie będzie. Powodem jest: 1) brak własnego kobaltu-60, 2) złe kapsułowanie radzieckiego kobaltu-60 by mógł pracować przez co najmniej 15 lat w źródłach ze schronem wodnym, a wreszcie 3) trudna dostępność dobrych źródeł kobaltu-60 (tylko w Kanadzie). Koszt gotowej instalacji z odpowiednim ładunkiem kobaltu-60 dla znaczącej produkcji wynosi minimum 5 mln. dolarów USA z koniecznością uzupełniania świeżym radionuklidem co 5 lat, za ok. 1 mln. USD.

Główną uwagę poświęcimy wydajności akceleratorów elektronów, których liczba w Polsce jest porównywalna z wyposażeniem lepiej rozwiniętych krajów należących w roku 1989 do RWPG [1], a projekty rozwojowe są pomyślne.

Motywacją sporządzenia tego raportu jest między innymi chęć poinformowania chemików radiacyjnych przygotowujących technologię radiacyjną o wydatkach energetycznych niezbędnych na przewidywaną produkcję. Zużycie energii w badaniach poznawczych, np. wykonywa-

nych metodą radiolizy impulsowej na identycznym sprzęcie, nie jest brane pod uwagę, natomiast wielkość ta staje się istotna w badaniach ukierunkowanych na zastosowania. Wydatki energetyczne w obróbce radiacyjnej są niemałe i dlatego wskazane jest dokonanie odpowiedniej analizy już w początkowej fazie badań. Obliczenia takie mogą być wykonane przy określaniu wymaganej dawki, stopnia jej jednorodności oraz gabarytów obiektu poddawanego obróbce, a także wielkości produkcji w skali rocznej. Spojrzenie technologiczne, w odróżnieniu od badań poznawczych, musi uwzględniać aspekty energetyczne oraz skalę przedsięwzięcia.

2. WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE ŹRÓDEŁ GAMMA

W grupie tej liczą się praktycznie tylko źródła zawierające Co-60, ponieważ stosowanie źródeł z Cs-137 zostało w większości przypadków zarzucone z powodu niemożności uzyskania bezpiecznej formy chemicznej tego nuklidu. Los ten podzieliło transportowalne źródło zbudowane we Francji dla polowych celów agrotechnicznych.

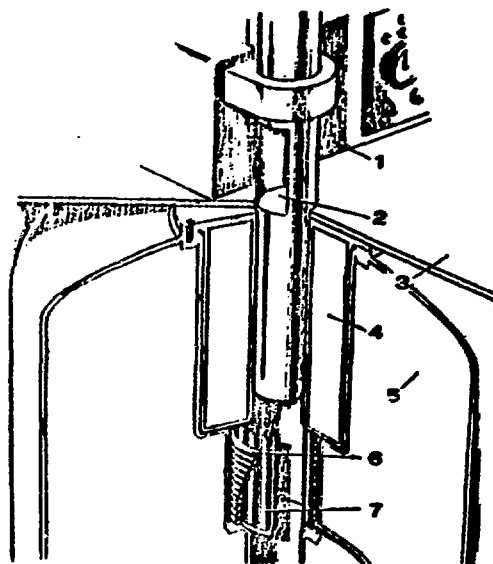
To, że w ogóle wspominam źródła gamma, wynika z konieczności pokazania, że źródła laboratoryjne z samej zasady nie mogą mieć znaczenia przemysłowego oraz z drugiej strony - że źródła przemysłowe nie osiągają wydajności technologicznych bliskich 100%.

Przeznaczeniem źródła laboratoryjnego jest uzyskanie możliwie dużej i maksymalnie jednorodnej dawki promieniowania w małej objętości, nawet kosztem utraty większości energii. Rys. 1 przedstawia komorę napromieniowań w popularnym źródle Gammacell 220, Hotspot lub zbliżonym radzieckim Исследователю. Jak widać, pole promieniowania w komorze jest stosunkowo jednorodne, jednak większość promieniowania z rurek wypełnionych kobaltem-60, umieszczonym na obwodzie komory jest pochłaniana bezużytecznie przez biologiczną osłonę ołowianą. Wykorzystanie promieniowania można szacować na ułamki procenta, ponieważ komora rzadko jest wypełniona całkowicie. Utrata większości energii promieniowania jest wliczona w koszty badań lub koszty drobnych napromieniowań wykonywanych w innych celach, takich jak próby wytworzenia mutacji u roślin przez napromieniowanie nasion, itp.

Z punktu widzenia stopnia wykorzystania energii promieniowania, jeszcze gorzej od źródeł typu Gammacell są źródła onkologiczne, tzw. bomby kobaltowe. W źródłach tych operuje się skolimowaną wiązką promieniowania gamma, wyciętą z pełnego kąta bryłowego, w który promieniuje izotropowo kobalt-60. Tak duże straty energetyczne służą jednak celom wyższym, to znaczy terapii nowotworów.

Jasną jest rzeczą, że pełniejsze wykorzystanie promieniowania uzyskać można tylko umieszczając obiekt nie wewnątrz koszyka ze źródłami, lecz wokół nich. Dwa źródła, skonstruowane w latach

sześćdziesiątych w Zakładzie Chemii Radiacyjnej b. Instytutu Badań Jądrowych w Warszawie, umożliwiając takie eksperymenty. Również laboratoryjne źródło w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej wręcz zakłada ustawianie



Rys.1. Przekrój źródła typu Hotspot lub podobnych

- 1) Tablica kontrolna,
- 2) Komora napromieniowań,
- 3) Płyta przygotowania próbek,
- 4) i 5) Osłony ołowiane,
- 6) Spirala z wodą chłodzącą

Vg [2]

próbek wokół centralnego koszyka. Aby uzyskać dawkę z dopuszczalnym stopniem niejednorodności, stosuje się wielokrotne przemieszczanie napromieniowanych obiektów połączone z nieuniknionym przerywaniem ekspozycji.

Dopiero par excellence przemysłowe źródła z kobaltem-60 mogą zapewnić efektywne wykorzystanie promieniowania. Energia zgromadzona w tym radionuklidzie bierze początek w specjalnie do tego celu eksploatowanym reaktorze jądrowym o optymalnym dla czasu życia kobaltu-60 strumieniu neutronów i innych parametrach. Niewątpliwie producentem najlepszych źródeł kobaltu-60 o optymalnej aktywności właściwej, jak również instalacji do wielokrotnego automatycznego przekładania pudeł z napromieniowywanym materiałem, jest firma Nordion w Kanadzie, poprzednio występująca pod nazwą macierzystej Atomic Energy of Canada. Negatywny wydźwięk słów atom, jądro lub energia nuklearna spowodowało zmianę nazwy na neutralną dla ucha szerokiej publiczności, nie starającej się bliżej zapoznać z istotą spraw technicznych.

Cechą charakterystyczną instalacji, załadowanej często kobaltem-60 o aktywności większej niż milion curie, jest piaski

napromiennik przechowywany pod wodą. Podnoszony jest on do pozycji pracy w komorze, gdzie wokół niego przestawiane są automatycznie pudła w trzech warstwach w celu optymalnego wykorzystania promieniowania i uzyskania równomierności dawki. W ten sposób wydajność procesu można podnieść do 30%, jeżeli urządzenia mechaniczne są niezawodne i dobra jest organizacja pracy, zapewniająca ciągły transport obiektu poddawanego obróbce do zakładu napromieniowań. Istnieją szczegółowe opisy instalacji w języku polskim [2, 3]. Najnowsze wersje znajdują się w materiałach firmy Nordion.

Jakkolwiek w Polsce nie ma widoków na źródła przemysłowe γ to jednak są one, choć w niewielkim stopniu, stosowane w krajach Europy Środkowej i Wschodniej. Dla pełnego obrazu wydajności technologicznej źródeł podać można przykład węgierski. W przedsiębiorstwie Agroster w Budapeszcie pracuje bez przerwy przez całą dobę źródło z kobaltem-60 o aktywności 7,5 PBq czyli 200 kCi (marzec 1990). Co dwadzieścia minut transporter przesuwają skokowo łańcuch 50 worków z pieprzem po 50 kg każdy. Obiekt okrąży źródło otrzymując dawkę średnią około 6 kGy inaktywującą dużą część drobnoustrojów oraz insektów. Aktualna cena kobaltu-60 wynosi około 1 dolara USA za 1 Ci. Ponieważ co 5 lat połowa aktywności zanika, przeto łatwo obliczyć koszt wsadu izotopowego. Istnieją projekty ubocznej produkcji kobaltu w węgierskiej elektrowni jądrowej, ponieważ aktywność właściwa radionuklidu nie odgrywa tu większej roli i jeszcze wielkość ok. 20 Ci/g jest wystarczająca. Aktywność taką można uzyskać w wyniku trzyletniego przebywania wsadu w reaktorze, w słabym strumieniu neutronów.

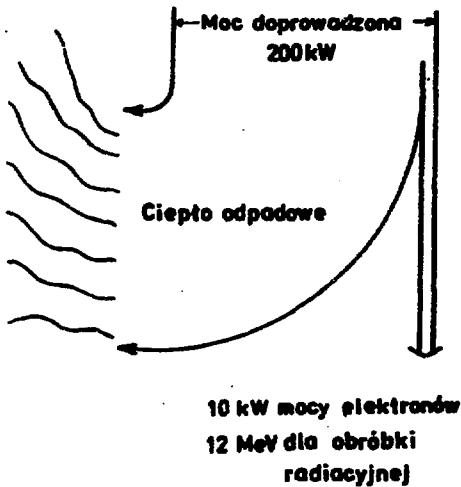
3. ŹRÓDŁA AKCELERATOROWE DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ

3.1. Akceleratory liniowe

Przegląd źródeł pod kątem ich wydajności rozpoczynamy od akceleratorów liniowych, od których zaczęła się obróbka radiacyjna radiacyjna na świecie i w Polsce. Już w roku 1965 zainteresowaliśmy się instalacją dużego akceleratora. Po ustaleniu z wykonawcą możliwych do uzyskania parametrów autor przedstawił publikację [4], która podała technologicznie przewidywane ilościowe dane produkcyjne. Mimo że dane te przedstawiono jeszcze w fazie projektowej, okazały się one nadal aktualne w ciągu następujących 25 lat. Dziś jawią się one jako nieco zbyt optymistyczne, a na pewno są nimi, jeżeli chodzi o przewidywania produkcyjne na chwilę bieżącą. Jest to wynikiem starzenia się tego pierwszego w Polsce akceleratora. Mimo tego, do roku 1995 będzie on nadal głównym producentem scałkowanej ilości energii promieniowania jonizującego w Polsce poczynając od roku 1970.

Dla wprowadzenia Czytelnika w realia obróbki radiacyjnej przeprowadzmy uaktualnione obliczenia wydajności technologicznej

akceleratora LAB 13/9, wykonanego w latach 1968-1970 według naszych założeń jako prototyp w Instytucie im. Jafrenowa (ZSRR). Zaden instytut w ZSRR nie produkował podobnych akceleratorów o ponad amperowym natężeniu wiązki elektronów w impulsie, toteż podzielono się z konstruktorami leningradzkimi wypróbowaną koncepcją firmy Varian, z którą autor zapoznał się wyczerpująco w Risoe National Laboratory w latach 1963 i 1965.

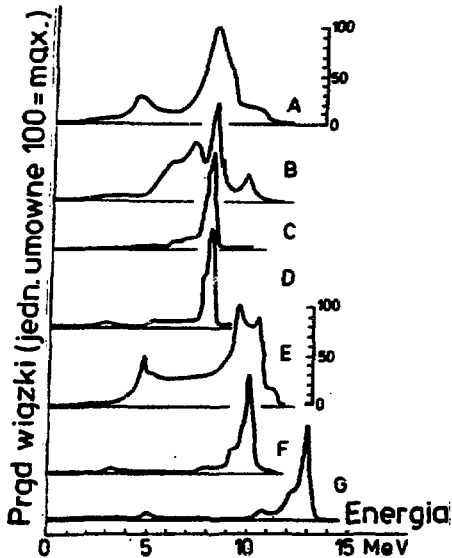


Rys.2. Bilans energetyczny akceleratora liniowego elektronów

Bilans energetyczny typowego liniaka przedstawia rys. 2. Jak widać, większa część energii zużytej na wytworzenie wiązki elektronów o energii 10-13 MeV zostaje zmarnowana na ciepło odprowadzane do atmosfery głównie w chłodni ociekowej ostatniego obiegu wody chłodzącej. Ciepło to ma małą wartość termodynamiczną i jest bezużyteczne. Jest to ogromny hacarz płacony za uzyskiwanie dość przenikliwej energii jonizującej, niestety nie dający się uniknąć. W ciągu ostatnich 25 lat poczyniono pewien postęp poprawy wydajności. Na przykład nowa firma szwedzka Scanditronix oferuje od roku 1989 liniaki EB 10, o których twierdzi, że dają wiązkę elektronów 10 MeV o maksymalnej mocy 30 kW. Moc podawane przez firmy są często zawyżane i odnoszą się do szczególnych warunków. W konkretnym przypadku nie udało się ustalić, czy moc odnosi się do wiązki odchylonej, czyli po odseparowaniu elektronów o niższej i wyższej energii od nominalnej. Wsad energetyczny podaje się na około 300 kW. Zabezpieczenia wyłączają instalację po przekroczeniu mocy 416 kW (630 A, 350/220 V). Nawet jeżeli oferta jest w pełni wiarygodna, to konstrukcja ta nie oznacza przełomu w wydajności liniaków - tego najbardziej uniwersalnego w zastosowaniach akceleratora [5].

Dla realnych warunków bezpieczniejsze jest przyjąć, że w wiązce elektronów odzyskuje się tylko 5% włożonej energii. Nie jest to

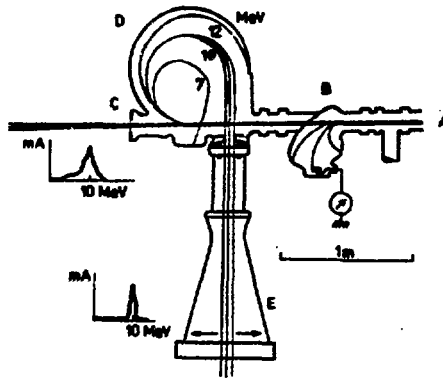
Jednak koniec strat. Przyśpieszone elektrony nie są monoenergetyczne (rys. 3) i przy odchyłaniu ich o 270° (rys.4) frakcje o mniejszej i większej energii zostają rozproszone. W ten sposób tracimy jeszcze około 20% mocy. Decyzję odchylenia wiązki technologicznej przy odzyskiwaniu pełnej mocy w wiązce prostej do badań poznawczych podjęto w projekcie wstępny, kierując się przekonaniem, że głównym zadaniem akceleratora w instytucie



Rys.3. Wybór widm energetycznych elektronów akceleratora LAB 13/9.

- A) 8 MeV, 0,5 μ s, najlepsze strojenie
- B) 8 MeV, 2,5 μ s złe strojenie
- C) 8 MeV, 2,5 μ s najlepsze strojenie
- D) 8 MeV, 5,5 μ s najlepsze strojenie
- E) 10 MeV, 0,5 μ s złe strojenie
- F) 10 MeV, 5,5 μ s
- G) 13 MeV, 5,5 μ s strojenie rutynowe dla obróbki radiacyjnej

naukowym będą badania, a nie produkcja. Odginanie wiązki ma jednak pewne zalety technologiczne. Odcinanie "ogona" energetycznego tuż powyżej 10 MeV, a tym bardziej 13 MeV, zmniejsza niebezpieczeństwo aktywacji jądrowej, czyli pojawienia się indukowanej promieniotwórczości. Być może dlatego wspomniana firma szwedzka zastosowała odchylenie wiązki (rys.5). Drugą przyczyną było ułatwienie operacji prostowania wiązki odchyłonej do położenia prostopadłego do transportera. Jest to zresztą nowość techniczna, po raz pierwszy stosowana w dziedzinie obróbki radiacyjnej z użyciem przyśpieszonych elektronów. Budzący zdziwienie system napromieniowania transportera od dołu jest rzadko stosowany. Po raz pierwszy wypróbowany był on w Danii jeszcze w początku lat sześćdziesiątych w instalacji o mocy 10 kV i energii 10 MeV, wykupionej później przez międzynarodowy oddział firmy Raychem. Urządzenie to jest elementem produkcji wyrobów termokurczliwych.

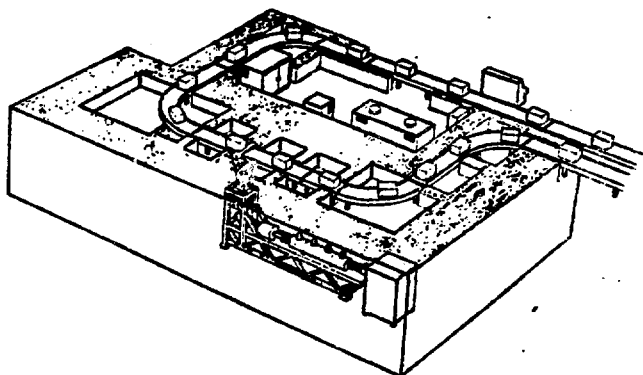


Rys. 4. Separacja magnetyczna elektronów różnych energii w czasie odchylenia. A) Wiązka pierwotna elektronów, B) Elektromagnes odchyłający elektrony w celu pomiaru ich energii, C) Wylot wiązki prostej przy niezasilanych elektromagnesach, D) Elektromagnes odchyłający elektrony o 270°, E) Tubus odchylonej wiązki przemiatającej. Na małych wykresach podano widma wiązki prostej i odchylonej

3.2. Teoretyczna i rzeczywista wydajność liniowego akceleratora elektronów

Parametry elektryczne akceleratora pozwalają obliczyć maksymalną oczekiwaną moc urządzenia. Od razu trzeba zaznaczyć, że nominalne wartości nie zawsze są osiągalne i nie zawsze udaje się akcelerator optymalnie dobrać. Maksymalne parametry często powodują niestabilną pracę i nieraz od razu decydujemy się na parametry gorsze. Ustalanie warunków pracy odbywa się codziennie po uruchomieniu instalacji i osiągnięciu równowagi termicznej, a rezultatem jest pomiar natężenia prądu wiązki elektronowej. Prąd wiązki mierzony jest poprzez absorbowanie jej w grubej warstwie grafitu, skąd zostaje odprowadzony do ziemi. O mocy wiązki decyduje też energia elektronów, również zmierzona obiektywnie, przy użyciu pomocniczego elektromagnesu odchyłającego wiązkę (rys. 4). Iloczyn natężenia prądu wiązki i energii elektronów daje moc wiązki, zazwyczaj wyrażaną w kilowatach. Typowe wartości prądu średniego w LAE 13/9 to 560-640 μA dla energii 10 MeV i impulsów 5,5 μs powtarzanych 150 razy na sekundę. Jak widać, iloczyn prądu i energii elektronów daje 5-6 kW czyli ok 2/3 mocy nominalnej. Dość szerokie przedziały uzyskiwanych mocy są zrozumiałe, ponieważ poszczególne zespoły akceleratora zużywają się w

sposób nierównomierny. Także ich jakość w chwili instalowania i po świeżej wymianie części co 500 - 3000 godzin (działo elektronowe, klistron) jest różna. Ciągłemu zużyciu ulegają też ele-



Rys. 5. Rysunek poglądowy instalacji liniaka Scanditronix

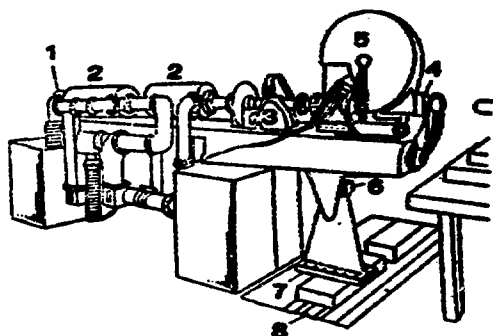
menty wymieniane dopiero przy generalnych remontach, jak elementy struktury przyspieszającej, pompy tytanowe do wytwarzania próżni i inne.

Wiązka prosta ma moc o połowę większą od wiązki odchylonej. Jest to istotne w badaniach, lecz praktycznie bezużyteczne w obróbce radiacyjnej. Autorowi znany jest jeden przypadek w technice światowej (akcelerator liniowy pod Bolonią), gdzie wiązkę prostą stosuje się rutynowo do celów komercyjnych, mianowicie do ulepszenia tyryktorów na skalę zaspakajającą niezbyt duży popyt.

Większość przypadków obróbki radiacyjnej wymaga wiązki o geometrii szerokiej, zapewniającej równomierne napromienianie dużych paczek z materiałem uszlachetnionym (rys. 6). Uzyskuje się ją przez odchylenie i przemiatanie. Nie dzieje się to za darmo i jest związane ze stratą około 20% mocy. Można to obiektywnie zmierzyć, umieszczając pod dużym oknem wylotowym elektronów specjalny kolektor prądu wiązki, dłuższy niż szerokość przemiatania. W celach praktycznych stosuje się pomiar prądu zbieranego przez cienką folię skalibrowaną dozymetrycznie w stosunku do pełnej absorpcji wiązki przez pochłaniacz grafitowy.

Jak widać, z włożonych 150 kW mocy pozostanie nam na transporterze około 5 kW. Jest to jednak dopiero pierwsze ograniczenie mocy wiązki i nie należy tej mocy przyjmować za podstawę kalkulacji wielkości produkcji. Dalsze straty wynikają ze specyfiki pochłaniania energii promieniowania przez materię. Podstawowy wykres pochłaniania wiązki prostej przedstawia rys. 7. Widać z niego poważną niejednorodność odkładania energii w masie materiału. Musi to jednak być tolerowane w badaniach metodą

radiolizy impulsowej, ponieważ nie ma innego wyjścia. Trudności tych unika się stosując naczynia spektrofotometryczne o ograniczonej grubości oraz szerokie wiązki światła analizującego, które



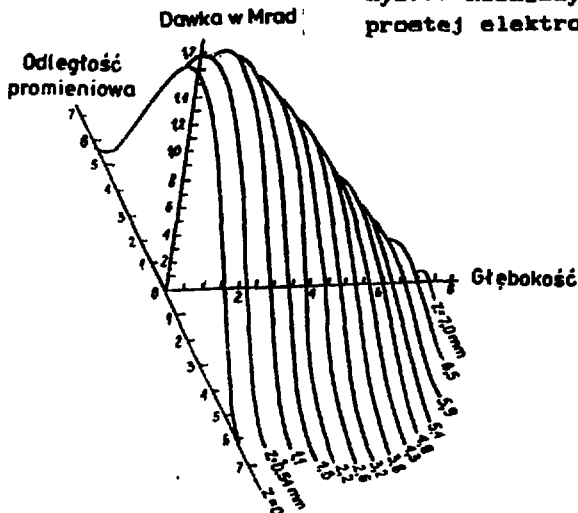
Rys. 6. Akcelerator LAR 13/9 w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie (dawniej część Instytutu Badań Jądrowych)

- 1) Działo elektronowe,
- 2) Sekcje przyspieszające,
- 3) Elektromagnes odchylający wiązkę dla obróbki radiacyjnej,
- 4) Okno wiązki prostej,
- 5) Elektromagnes odchylający wiązkę w celu pomiaru energii,
- 6) Elektromagnes przemiatający wiązkę,
- 7) Okno elektronów technologicznych,
- 8) Transporter obiektów obróbki radiolizy impulsowej

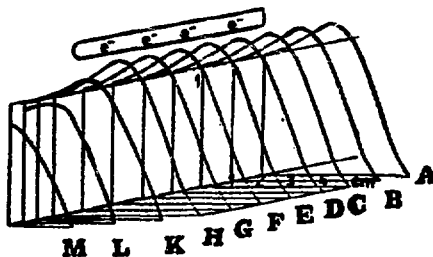
powodują uśrednienie pomiaru absorpcji światła. Podobnie niefortunna sytuacja ma miejsce w napromieniowaniach onkologicznych, gdzie chodzi z kolei o maksymalną niejednorodność dawki, która winna być dostarczana punktowo. Najczęściej w tym celu stosuje się obracanie pacjenta w stosunku do akceleratora (lub akceleratora w stosunku do pacjenta) i wielokrotne powtarzanie impulsów. Ani metoda stosowana w radiolizie impulsowej, ani w onkologii nie może mieć zastosowania w obróbce radiacyjnej.

Poszukiwanym rozwiązaniem jest właśnie przemiatanie i w ten sposób uzyskanie geometrii wiązki szerokiej. Wiązka ta składa się z nałożonych na siebie z niewielkim przesunięciem pojedynczych krzywych wiązki prostej. W efekcie uzyskuje się zupełnie nową krzywą głębiniową rozkładu dawki, przedstawioną na rysunkach 8 i 9. Widać tu charakterystyczny wzrost dawki pod powierzchnią materiału oraz dość gwałtowny spadek pod koniec zasięgu elektronów. Jak wynika z wykresu, końcowa część zasięgu jest mało użyteczna z powodu bardzo dużej niejednorodności dawki.

Rys. 7. Rozkłady dawek od wiązki prostej elektronów w wodzie

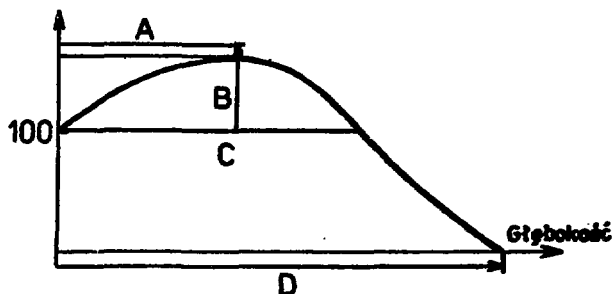


Produkt musi być napromieniowany z tolerowalną niejednorodnością, a to oznacza, że maksymalną jego grubość stanowi odległość pomiędzy płaszczyznami, na których dawka wejściowa i wyjściowa są sobie równe. Cały "ogon" krzywej głębinowej jest więc stracony, a stanowi on około 30-40% mocy, zależnie od energii elektronów i charakterystyki absorpcyjnej materiału. Nie rozważamy tu zniekształceń krzywej głębinowej na skrajach przemieszczania. Z tego powodu wspomniany liniak Scanditronic wyposażony jest w elektromagnesy prostujące wiązkę elektronów do położenia prostopadłego względem transportera.



Rys. 8. Rozkład dawek głębiniowych od wiązki przemieszczanej

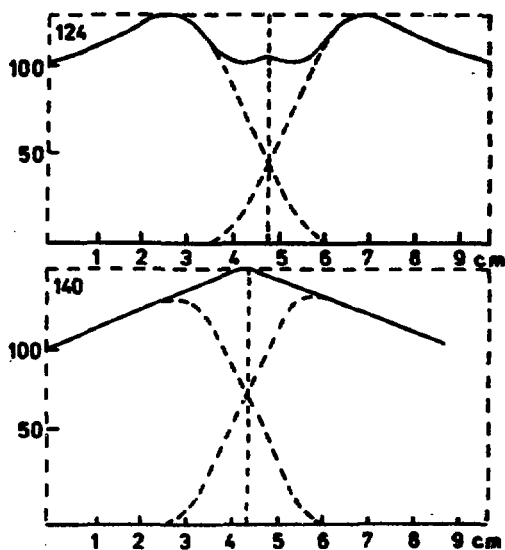
Niezależnie od tego, wiązka odchylona i przemieszczana nie może być wykorzystana na skrajach przemieszczania, co wynika z rysunku 8. Te skrajne części frontu napromieniowującego muszą być też odcięte, co powoduje dalsze 15 % strat.



Rys. 9. Parametry dawki głębinowej.

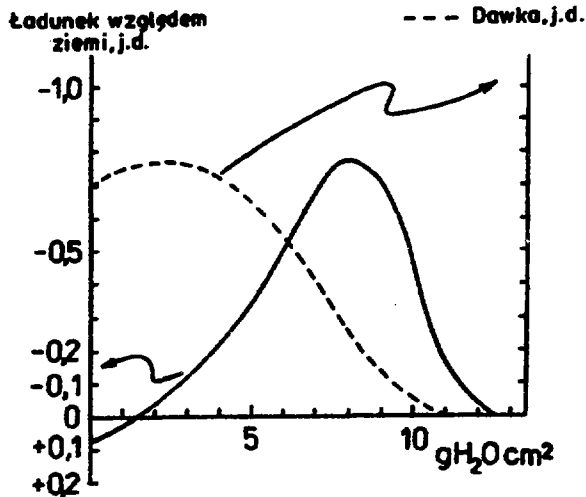
- A) Głębokość dawki maksymalnej,
- B) Różnica pomiędzy dawką maksymalną a dawką wejścia,
- C) Głębokość użyteczna zasięgu wiązki,
- D) Całkowity zasięg elektronów

Duże straty na odciętym "ogonie" krzywej pochłaniania (Rys. 9) skłaniały wielokrotnie do propozycji napromieniowania dwustronnego (rys. 10). Miało to dawać nie tylko pełniejsze wykorzystanie mocy wiązki, ale i powstanie możliwości napromieniowania znacznie grubszej warstwy materiału, niż by to wynikało z krzywej



Rys.10. Rozkład dawek promieniowania od elektronów 12 MeV w materiale napromieniowanym dwustronnie. Widać krytyczną rolę grubości materiału

zasięgu elektronów. Na przeszkodzie szerszemu rozpowszechnieniu się tej metody stanęły dwie okoliczności. Pierwsza wynika z rzadko branej pod uwagę krzywej rozkładu nadmiarowych elektronów w materiale napromieniowanym jednostronnie (rys.11). Krzywa ta



Rys. 11. Porównanie krzywych rozkładu ładunku odłożonego w materiale dielektrycznym z krzywą dawki pochłoniętej w tym materiale (krzywa przerywana)

nie pokrywa się, jak widać, z krzywą dawki. W normalnej obróbce radiacyjnej, trzymając się reguły "dawka wejścia równa dawki wyjścia" nie dopuszczamy do zatrzymania krytycznej ilości ładunku. W napromieniowaniu dwustronnym natomiast przechwytyujemy pełną ilość wstrzykniętych elektronów i w efekcie łatwo następuje w tworzywach sztucznych rozładowanie elektryczne połączone z wypaleniem dziur w napromieniowanym materiale.

Drugą komplikacją metody napromieniowania dwustronnego okazały się trudności techniczne ładowania transportera i możliwości dostarczenia błędnych dawek, praktycznie nie istniejące przy napromieniowaniu jednostronnym. W napromieniowaniu dwustronnym powrócimy jeszcze w przypadku akceleratorów małej energii, gdzie kwestie grubości materiałów są bardziej krytyczne.

Dla oceny realnych możliwości akceleratora trzeba uwzględnić jeszcze ograniczenie techniczne, jakie wynika z konieczności strojenia urządzenia, oraz potrzeby dozometrii wiązki praktycznie przed każdą zmianą warunków obróbki. Ocena ilościowa potrzebnego czasu jest trudna, ale doświadczenie wykazuje, że trzeba przewidywać na to około 10% czasu pracy urządzeń na pełnej mocy. Nie wliczamy tu okresów przeglądów i napraw, ponieważ nie obciążają one czasu biegu akceleratora na pełnej mocy.

Podsumowanie efektywnej mocy wiązki dla idealnego absorbera energii wygląda następująco, w kolejności występowania strat:

- Z wiązki prostej liniaka o nominalnej mocy 250 kW otrzymujemy średnio na transporterze, po uwzględnieniu zmniejszonej mocy w skutek zużycia części i głównej straty na odchyłaniu, efektywnie tylko 5 kW.

- Z tej mocy po obciążeniu bezużytecznych skrajów szerokości przetwarzania uzyskujemy 4 kW.

- Po uwzględnieniu strat wzdłuż transportera (przestrzenie puste pomiędzy skrzynkami i opakowaniami) mamy 3,5 kW.

- Po stratach na specyficzne głębiniowej pochłaniania mamy już tylko 2 kW.

Wszystkie dane są zaokrąglone, ponieważ wahają się znacznie. Bezpieczeństwo przewidywać należy raczej zawsze dolne ze średnich granic wydajności.

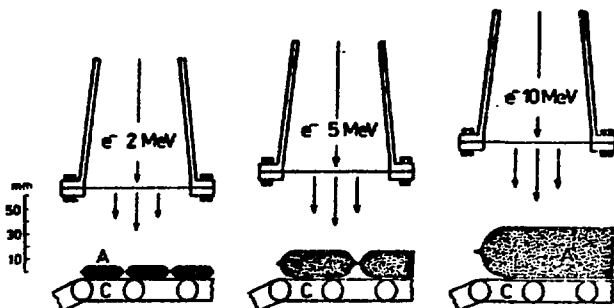
W tym miejscu analizy wartości mocy użytecznej można już przeprowadzić szacunkowe przeliczenia realnej mocy wiązki w kategoriach ilości materiału poddawanego obróbce. Można bowiem sobie wyobrazić taki obiekt obróbki, który będzie pochłaniał całą wiązkę "netto".

Stosując układ SI można łatwo przeliczyć moc 2 kW i czas obróbki na ilość promieniowania pochłoniętego w masie materiału. wyrażoną w grejach (dzule na kilogram). Odnieśmy rozważania do jednej godziny napromieniowania. Ponieważ 1 V_e wynosi 1 J, więc 2 kWh oznaczają 7200 kJ/h. A więc stu kilogramom wody można dostarczyć w ciągu godziny dawkę 72 kGy, albo jeszcze bardziej poglądowo dawkę 36 kGy dwustu kilogramom materiału wodnisteo, jak mięso. Jest to dawka wynosząca w dawnych jednostkach 3,6 Mrad, czyli dawka proponowana do sterylizacji materiału poważnie zakażonego. Wymaga to, podkreślmy raz jeszcze, doprowadzenia 250 kWh energii elektrycznej.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że obliczenie to odnosi się do materiału idealnie wypełniającego strefę optymalnego wykorzystania strefy tolerowalnej jednorodności dawki. Tak idealnym absorberem byłaby tylko ciecz, pompowana pod oknem akceleratora przez komorę napromieniowań, o grubości warstwy określonej krzywą pochłaniania dla dawki wejścia równej dawce wyjścia. Przez pewien okres eksploatacji akceleratora LAR wydawało się, że obiektem takim będzie lateks, choć z góry było wiadomym, że pompowanie cieczy tykotropowej nie może zapewnić turbulentnego przepływu. będącego warunkiem prawidłowego rozkładu dawki.

Ciecze jako obiekty obróbki radiacyjnej są przypadkiem bardzo rzadkim i nie znamy takiego przykładu obróbki w tej grupie materiałów. Najbardziej zbliżonym przypadkiem są materiały sypkie, ale i tu trudno sobie wyobrazić "przepływ" proszku pod oknem akceleratora, a tym więcej pompowanie takiego obiektu. Może mogłoby to być specjalnie skonstruowany transporter miseczkowy.

ale do tej chwili koncepcja taka nie była realizowana z powodu braku zapotrzebowania. Technika przesypywania ziarna w polu promieniowania w celu unieszkodliwienia insektów jest daleka od precyzyjnego dozowania energii, jaka jest wymagana przez organa kontrolne.



Rys. 12. Maksymalne grubości materiału sypkiego o małym ciężarze nasypowym (pieprz), napromieniowanego elektronami różnej energii

Jedyną zaletą proszków jest możliwość kształtowania opakowań do optymalnej grubości materiału. Rys. 12 przedstawia technikę napromieniowania pieprzu w celu sterylizacji, dla różnej energii elektronów. Towar musi być opakowany, by uniknąć wtórnego zakażenia mikroorganizmami. Opakowania winny również utrzymywać materiał napromieniowany w zadanym kształcie i grubości.

Opisany przypadek jest niemal optymalny, ponieważ można w ten sposób maksymalnie wykorzystać użyteczną część wiązki i dostosować kształt opakowania do krzywej zasięgu elektronów danej energii. Niestety, większość materiałów, które chcemy poddać obróbce, ma kształty nie tylko nieodpowiednie do napromieniowania, ale co więcej zdecydowanie nie dające szansy uzyskania rozsądnej wydajności. Niekiedy obróbka taka nie jest w ogóle możliwa. Nie da się np. napromieniować owoców lub jarzyn o średnicy większej niż 40 mm elektronami o energii 10 MeV, a napromieniowanie sztuk trochę mniejszych jest związane z tak niejednorodną dawką, że cel nie będzie osiągnięty, a rezultatem będą tylko szkody. Sterylizacja kości ludzkich do przeszczepów musi być ograniczona do kształtek takich rozmiarów, w których nierównomierność dawek będzie jeszcze tolerowalna. Na szczęście margines dawki jest w tym przypadku szeroki. Gabaryty obiektu nie są tu krytyczne, ponieważ większość kształtek jest niewielka. Dla większych elementów pozostaje promieniowanie gamma.

Przykład przeszczepów kostnych jest wart dodatkowej informacji, że nawet przy najbardziej wyrafinowanym ułożeniu opakowań wykorzystanie promieniowania spada poniżej 10 %. Odpowiada to napromieniowaniu najwyżej 20 kg na godzinę, jeżeli będziemy musieli

zastosować zasobniki zimna, w których umieszczone są fragmenty kości. Społeczne znaczenie tego rodzaju obróbki radiacyjnej jest jednak na tyle duże, że nawet tak małe wydajności, i wynikające stąd znaczne koszty nie są w ogóle brane pod uwagę.

Jeszcze mniejszych wydajności oczekiwać trzeba w przypadku uszlachetniania tyrystorów. Elementy te umieszczone są w dużych odstępach w plastikowych paletach i dlatego właściwy obiekt pochłania tylko niewielką część promieniowania. Wartość uszlachetnionego elementu półprzewodnikowego jest jednak tak duża, że w ogóle nie przeprowadza się szacunku wykorzystania promieniowania, choć jest ono rzędu zaledwie jednego procenta.

Podobnie trudno wymagać efektywnego wykorzystania wiązki w przypadku sieciowania polimerów, np. polietylenu uformowanego w rury różnej grubości. Mimo dużych dawek, pięć- do dziesięciokrotnie większych od sterylizacyjnych, i tu toleruje się znikome wykorzystanie wiązki wobec ogromnych korzyści ekonomicznych. Produkcję rur termokurczliwych wyraża się nie w kilogramach lecz kilometrach. Po przeliczeniu na jednostki wagowe, bo w nich wyraża się absorpcję promieniowania jonizującego, uzyskujemy i tu wydajności zaledwie kilku procent.

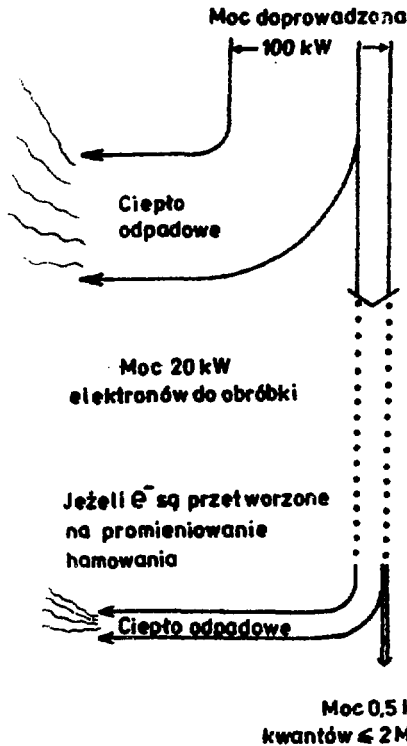
Przedstawione obliczenia można skonfrontować z realnymi kwotami produkcyjnymi akceleratora LAE 13/9 w ostatnich latach. Wyniki są właśnie takie, jak przewidują ostrożne obliczenia. Z tego powodu doświadczenie wynikające z eksploatacji LAE 13/9 winno być uwzględniane w następnych inwestycjach.

3.3 Akceleratory elektronów poniżej energii 2MeV i mocy dziesiątek kilowatów w wiązce

Akceleratory tych energii z reguły pracują z lepszą wydajnością elektryczną, co przedstawia rys.13. Przyczyną tego nie sposób wyjaśniać w tym opracowaniu. Niestety specyfika eksploatacyjna akceleratorów tego typu jest całkowicie odmienna niż akceleratorów liniowych i bardziej ograniczona. Spowodowane jest to przede wszystkim małym zasięgiem elektronów, wynoszącym 2 mm dla elektronów 1 MeV i 3 mm dla elektronów 2 MeV w materiale ekwiwalentnym wodzie. Scałkowane pole optymalnej grubości materiału w stosunku do bezużytecznego "ogona" jest jeszcze mniej korzystne niż w przypadku liniaka.

Możemy przeprowadzić obliczenia dla elektronów 2 MeV analogiczne jak w przypadku liniaka. Niestety współzależność mocy i energii elektronów zaznacza się jeszcze silniej i trzeba tę okoliczność wyraźnie uzgodnić z producentem akceleratora. Należy operować wykresem w układzie współrzędnych energia elektronów - moc wiązki, na którym zaznacza się obszar użyteczny. Często okazuje się, że moc 20 kW odnosi się do energii 1 MeV, a przy bardziej atrakcyjnej energii 2 MeV maksymalna moc spada i wynosi

już tylko 10 kW! Różnice konstrukcyjne akceleratorów małych energii są znacznie większe niż różnice pomiędzy liniakami, to też trudno w tym miejscu opisywać, które typy akceleratorów niekoenergetycznych mają korzystniejsze obszary mocy i dlaczego.



Rys. 13. Bilans energetyczny akceleratora elektronów małych energii, wraz z ewentualną konwersją na promieniowanie elektromagnetyczne

Różnice technologiczne pomiędzy jednym a dwoma megaelektronowoltami są często decydujące, na przykład elektronami o energii jednego MeV można napromieniowywać skutecznie folię polietylenową grubości 2,5 mm, podczas gdy elektronami o energii 2 MeV już 4 mm. Na to niebagatelne znaczenie w produkcji nie tylko folii, ale i rur termokurczliwych.

Podobnie jak w przypadku liniaków, wykorzystanie wiązki przez materiały różne od sypekich jest niewielkie. Dlatego proszkom poświęca się specjalną uwagę. Są one obiektem napromieniowania na dużą skalę w USA. Za przykład może służyć degradacja radiacyjna odpadów teflonowych na smary i kleje, (jeżeli instalacja wyposażona jest w prawidłową wentylację) oraz wstępne sieciowanie proszku polietylenowego do produkcji sztucznych stawów ortopedycznych (Columbia Research w stanie Maryland). Obydwa materiały są formowane w warstwy proszku o optymalnej grubości na tacach przesuwających się następnie na płynn timer poruszającym się transporte-

rze. W stosunkowo dobrej sytuacji znajdują się materiały ziarniste jak pieprz, który to przykład znajdujemy na rys. 12. Realizacja technologiczna operacji przy tak małej energii nie jest łatwa z powodu konieczności utrzymywania stałej grubości. Zwiększenie jej, np. przez przypadkowe złożenie się dwóch torebek może spowodować poważną zmianę niejednorodności dawki, co pociągnie za sobą zastrzeżenia organów kontrolnych.

Właściwy ciężar nasypowy pieprzu jest stosunkowo mały, dzięki czemu grubość torebek jest na tyle duża, że można nimi łatwo operować, natomiast proszki o większej gęstości, np. preparaty farmaceutyczne mogą już następczyc kłopoty. Co więcej, wymagania higieniczne są tu wyższe niż w przypadku pieprzu, który w większości krajów spożywa się bez higienizacji, z całym "dobrodziejstwem inwentarza", a do zakazów nie dochodzi z powodu ograniczonej ilości spożywanej na raz.

Materiały o większym ciężarze nasypowym, jak wspomniany teflon, muszą być przed obróbką radiacyjną dodatkowo rozdrabniane co zresztą w tym przypadku ułatwia degradację dzięki łatwiejszemu dostępowi tlenu.

4. KONWERSJA WIĄZKI ELEKTRONOWEJ NA ELEKTROMAGNETYCZNE PROMIENIOWANIE X (HAMOWANIA)

Zniechęcający praktyków krótki zasięg elektronów był od dawna powodem zainteresowania się konwersją wiązki elektronów na przenikliwe promieniowanie elektromagnetyczne. Podstawy teoretyczne nie są zachęcające, ponieważ wydajność konwersji jest stosunkowo dobra dopiero przy dużych energiach, np. 7,2% dla tarczy aluminiowej i 34% dla złotej przy energii elektronów 13 MeV. Tu jednak konwersja nie jest potrzebna, bo elektrony tej energii mają dobre zasięgi dla większości obiektów. Poza tym, z promieniowaniem elektromagnetycznym o maksymalnej energii 13 MeV nie wiadomo jak postępować właśnie z powodu ogromnego zasięgu. Stosowanie konwersji wiązki o energii 13 MeV byłoby i dlatego niepraktyczne, że metale tarczy ulegałyby istotnej aktywacji jądrowej. Pojawienie się radioaktywnego materiału w hali wyłączonego akceleratora spowodowałoby duże komplikacje eksploatacyjne.

W przypadku najbardziej potrzebnym, to jest elektronów o energii 2 MeV, wydajność konwersji jest bardzo mała i wynosi 1,1% dla tarczy aluminiowej lub 7,3% dla złotej. Literaturowe wartości konwersji różnią się, ponieważ zakłada się różny stopień wykorzystania bardzo rozciągniętego widma konwersji, a dla naszych celów nie można uwzględnić niskoenergetycznego "ogona", bezużytecznego w obróbce. Mały stopień konwersji elektronów 2 MeV oznacza, że dla wiązki elektronów o mocy 20 kW, wymagającej dostarczenia 100 kW, otrzymujemy 0,22% (Al) i 1,46% (Au) odzysk

mocy w postaci pola promieniowania X. Przeliczeń dla elektronów 1 MeV w ogóle nie podają, ponieważ już elektrony 2 MeV dają problematyczną wydajność.

Z przyczyn praktycznych tarczy złotej nie stosuje się do konwersji, natomiast dobiera się raczej metale ciężkie, trudno topliwe i trudno utleniające, o współczynniku konwersji bliższym złota niż aluminium.

O konwersji mówi się na świecie od 30 lat, ale pracującą instalację trudno znaleźć. Szczególnie głośno w ostatnich latach o konwersji elektronów 5 MeV, dla których współczynnik konwersji w w tarczy złotej wynosi 16%, co jest dobrym kompromisem pomiędzy wykorzystaniem bezpośrednim elektronów, a jeszcze tolerowalnym zasięgiem promieniowania hamowania o energii 5 MeV, które zresztą na maksimum mocy przy około 3 MeV. Z niecierpliwością oczekiwano referatu na Konferencji Kilmerowskiej w roku 1989. Okazało się, że firma Radiation Dynamics, budująca akcelerator z konwersją dla firmy farmaceutycznej Johnson & Johnson miała trudności z konstrukcją Dynamitronu na tak dużą energię. Były to kłopoty z precyzjami, które pociągnęły za sobą nieprzewidziane zwiększenie gabarytów samego akceleratora i podwyższenie jego ceny do 5 mln. dolarów USA. Specjalistom z Radiation Dynamics nie udało się wykonać konwertera i firma wycofała się z tej pracy. Konstrukcji konwertera podjęła się dopiero japońska firma Sumimoto, jednak z zalem trzeba stwierdzić, że przed konferencją nie udało się go uruchomić i demonstrowano jedynie przezrocza fotografii urządzeń. Są one rzeczywiście gigantyczne i postawią w nowym świetle obróbkę radiacyjną, jeżeli sprawdzą się obliczenia odprowadzania ciepła z tarczy pochłaniającej moc prawie 200 kW! [7].

Na tym właśnie polega trudność konwersji. W małej tarczy konwertera wytwarza się ogromna ilość ciepła. Na przykład, dla przemiatanej wiązki akceleratora 2 MeV oznacza to generację prawie dwudziestu kW mocy na kilkuset zaledwie centymetrach kwadratowych powierzchni. Uzmysłować to sobie można obrazem dwudziestu kilowatowych kuchenek elektrycznych o powierzchni jednej tylko płytki. Transport ciepła ma oczywiście wartości skonczone i nie da się uniknąć rozgrzania tarczy do setek stopni, by uzyskać gradient temperatur, przy którym występuje stan ustalony wymiany ciepła.

Z podobnym problemem spotkał się autor opracowując konwerter dla wiązki elektronów z liniaka LAE 13/9 w celu zbadania efektywności osłon biologicznych. Azurowy koszyk metalowy odpowiadający powierzchni pokrywanej przez wiązkę przemiataną został wypełniony scinkami drucików wolframowych z fabryki zarówek. Pakiet był przedmuchiwany strumieniem azotu, jednak nie udało się uniknąć utlenienia rozgrzanego wolframu, choć chodziło o odprowadzenie tylko 6 kW mocy cieplnej.

Konwersja stwarza nowe problemy konstrukcji urządzeń do napromieniowań rentgenowskich. Dla energii około 1 MeV, czyli dominującej w konwersji elektronów 2 MeV, mamy sytuację nieco podobną do przypadku promieniowania γ kobaltu-60 (średnia energia z dwóch kwantów 1,17 i 1,33 MeV przyjmowana jest do obliczeń jako 1,25 MeV). Mamy więc tu niedopuszczalną niejednorodność przy napromieniowaniu jednej warstwy materiału. Trzeba stosować co najmniej trzykrotny pasaż materiału pod wiązką i to z odwracaniem pakietów dla uzyskania zadanej jednorodności i przynajmniej dziesięcioprocentowego wykorzystania pola promieniowania. Realizacja tego przy poziomym transporterze jest trudna do wyobrażenia. Dlatego konstruktorzy wspomnianego urządzenia w Radiation Dynamics przyjęli od razu poziome ułożenie akceleratora z konwerterem i transporterem typu wieszakowego przesuwający koszyki linią wężową przed tarczą. Zależnie od rodzaju materiału poddawanego obróbce można wtedy stosować dwa, trzy lub cztery przejścia obiektu przed napromiennikiem bez istotnych zmian konstrukcyjnych.

Wobec małych wydajności konwersji i komplikacji napromieniania pojawia się pytanie, czy skóra jest warta wyprawk. Licząc straty dla złotej tarczy przy wiązce wyjściowej 10 kW i energii 2 MeV, otrzymamy przy pracy na dwie zmiany w ciągu 250 dni w roku masę towarową 2500 ton z dawką około 20 krad (200 Gy). Jeżeli oczywiście organizacja produkcji pozwoli tę ilość przepuścić bez przerw przez urządzenie transportujące.

5. NIEKTÓRE DODATKOWE ASPEKTY TECHNOLOGICZNE

Bilans wykazujący wydatki energetyczne uczy nas jeszcze jednego aspektu wydajności technologicznej. W dobie dzisiejszej świadomości ekologicznej trzeba pamiętać, że dla uzyskania 1 kWh energii elektrycznej trzeba spalić około 1/2 kg węgla (8). Ilość ta nie różni się wiele od podawanej w źródłach amerykańskich. A więc stacja sterylizacyjna o mocy 1/2 MW pobieranej przy czterozmianowej pracy w wymiarze 20 godzin na dobę będzie wymagała spalania około 5 ton węgla na dobę w sąsiadującej elektrowni, wytwarzając cały bagaż popiołu, SO_2 itd.

Sytuacja energetyczna kraju będzie prawdopodobnie wymagała oszczędnej gospodarki energią, postulowanej zresztą od lat. Jedną z form oszczędności jest przesuwanie dużych poborów mocy na okresy pozaszczytowe. Prawie megawatowi (4 duże akceleratory) odbiorcy będą prędzej czy później zmuszani do pracy nocnej i weekendowej. Wprowadzi to komplikacje operacyjne i podwyższenie kosztów osobowych. Zmniejszy się też wydajność ogólna, ponieważ nie udaje się wówczas wygospodarować na dobę tych dziesięciu godzin operacyjnych, zakładanych w obliczeniach. Zwiększy się również udział pełnoenergetycznego biegu jałowego w całym czasie poboru mocy.

Wspomniany na początku element technologiczny, to znaczny aspekt skali pojawia się dosyć niespodziewanie w masowej obróbce radiacyjnej. Jeżeli produkt sypki jest dobrze przygotowany, to sprawny załadunek i rozładunek nie nastręcza trudności. Mogą być wtedy zastosowane znane z technologii operacje podstawowe, np. będące w użyciu we wspomnianych zakładach Columbia dla teflonu i polietylenu. Znaczące ilości przerabianego materiału są transportowane z cystern strumieniem powietrza.

Sprawa komplikuje się w przypadku przypraw i innych materiałów sterylizowanych z konieczności w opakowaniu. Nabiera znaczenia prawidłowe przygotowanie logistyczne tych operacji, do tej pory nie praktykowane w Polsce, a nawet za granicą rozwiązane jeszcze niedostatecznie. Czynnikiem komplikującym jest transport obiektu obróbki z zakładu produkującego do zakładu napromieniowań, z reguły odległego o dziesiątki, jeżeli nie setki kilometrów. Zakłady napromieniowań są rzadko przygotowane do składowania tonowych ilości towaru. W przypadku akceleratora 1-2 MeV przyprawy muszą być napromieniowane w tak cienkich torebkach, że konieczne jest pakowanie ich w większe paczki po przejściu przez wiązkę. Trudno wyobrazić sobie, by to dwukrotne przepakowanie miało następować na terenie stacji napromieniowań. Potrzebne będzie raczej przetransportowanie materiału z powrotem do zakładu produkcyjnego lub hurtowni przemysłu spożywczego, wyposażonej w stanowiska przepakowań. Widać tu niewątpliwie korzyści sterylizacji lub higienizacji chemicznej lub termicznej wprost w zakładzie produkcyjnym, o ile możliwości on line. Przemysł sprzętu medycznego ma urządzenia do sterylizacji tlenkiem etylenu wprost na terenie zakładu i z niechęcią dopuszcza myśl transportu sprzętu do zakładu napromieniowań. Istnieje oczywiście możliwość instalacji akceleratorów lub źródeł gamma w zakładzie produkcyjnym, jednak musi być on sam w sobie kombinatem, jak to ma miejsce w trzech ośrodkach firmy Johnson & Johnson.

6. WNIOSKI I REGUŁY OSZACOWANIA WYDAJNOŚCI OBRÓBKI RADIACYJNEJ

Przedstawione rozważania pozwalają na oszacowanie zdolności akceleratora, którym dysponujemy, do poddania obróbce radiacyjnej określonego materiału oraz na ocenę wydatku energetycznego na obróbkę jednostki wagowej lub objętościowej materiału. Dane te, wzbogacone jeszcze o koszty inwestycyjne, obsługę kapitału, amortyzację itd., pozwalają oszacować przewidywany ostateczny koszt konkretnej obróbki.

W celu przeprowadzenia obliczeń należy znać następujące wartości:

1. Dawkę średnią promieniowania potrzebną dla osiągnięcia celu.
2. Tolerowalne wartości dawki w miejscach maksymalnego i minimalnego natężenia. Zaznaczyć trzeba, że z przyczyn fizycznych (okre-

łony kształt krzywej dawki głębinowej) dawka maksymalna musi być w najlepszym razie o około 10 % wyższa od średniej, a minimalna o około 10 % mniejsza. Osiągnięcie lepszej jednorodności jest niemożliwe i obróbka radiacyjna - ani źródłem gamma, ani akceleratorowa zapewnić tego nie może. Gorsze jednorodności otrzymuje się łatwo i nawet z mniejszym wydatkiem energetycznym.

3. Gęstość wagowa i elektronowa materiału. W przypadku materiału porowatego, np. pieprzu suchego, może wystarczyć ciężar nasypowy.

4. Możliwość formowania materiału: idealna (ciecze i materiały drobnoziarniste), zapewniająca najlepsze dostosowanie się do krzywych dawki głębinowej; ograniczona (materiał średnicziarnisty lub włóknisty); bądź wykluczająca obróbkę (grubość przekraczająca zasięg użyteczny promieniowania).

5. Grubość i kształt opakowań, jeżeli są niezbędne (sterylizacja radiacyjna).

6. Możliwy do uzyskania stopień upakowania wokół transportera.

7. Możliwy do uzyskania stopień upakowania wzdłuż transportera (procent przerw pomiędzy paczkami lub skrzynkami).

8. Zamierzony przerób materiału na jedno strojenie akceleratora i ewentualną dozometrię wybranego reżimu napromieniowania.

9. Możliwość ciągłego ładowania transportera (ważne przy małych dawkach, gdy ładowanie może nie nadążać).

10. Możliwości transportu i składowania na terenie stacji napromieniowań.

Podawanie w opisach źródeł wielkości rocznych przerobów materiału napromieniowanego nie ma większego sensu bez skonkretyzowania wyżej podanych dziesięciu punktów. Jedna i ta sama instalacja może dać produkcję roczną różniącą się o trzy rzędy wielkości, zależnie od tego co i jak się napromieniowuje.

Do analizy wydajności obróbki radiacyjnej należy też porównanie z innymi metodami prowadzącymi do porównywalnego celu. W celu porównania kosztów sterylizacji radiacyjnej z najtańszą metodą sterylizacji, tzn. termiczną, należy znać wytrzymałość termiczną składników obiektu oraz jego średnie ciepło właściwe. Najłatwiejsze jest porównanie pełnych sterylizacji, tzn. pełnych dawek promieniowania, z pełną sterylizacją termiczną, tzn. 120 C przez 15 minut, w której giną bez względu na stężenie wszelkie organizmy żywe łącznie z wirusami oraz związki termolabilne jak enzymy (które zresztą na ogół nienajgorzej znoszą sterylizację radiacyjną, jako "zimną"). Porównanie częściowego eliminowania organizmów żywych, np. wszelkiego rodzaju operacji pasteryzacyjnych, jest ściśle biorąc niemożliwe. Niepełne dawki sterylizacyjne bowiem inaktywują inne organizmy niż ogrzewanie do temperatur pośrednich, czyli niepełna sterylizacja termiczna.

Jakiegokolwiek byłyby założenia obliczeń, obróbka termiczna jeżeli daje te same rezultaty, wypada zawsze taniej. Technika

termiczna jest znana od czasów napoleońskich, gdy Francuz Appert opanował skuteczną sterylizację konserw mięsnych, która pomogła zlikwidować blokadę angielską i pozwoliła prowadzić długie i odległe kampanie. Wydatki energetyczne weszły do podręcznikowej literatury technicznej. W pozycji [9] znajdujemy przykłady obliczeń czasu potrzebnego na wysterylizowanie nawet ogromnych puszek o średnicy 20 cm, które nigdy nie mogłyby być obiektem obróbki radiacyjnej. Odpowiednie przeprowadzenie ogrzewania, np. w tunelu z przeciwpływem gorącego powietrza lub przegrzanej pary pozwala na redukcję do minimum strat cieplnych i aproksymowanie wydatku energetycznego do niezbędnej ilości energii potrzebnej na rozgrzanie obiektu do temperatury pasteryzacji lub sterylizacji. Ta ilość energii jest tylko drobnym ułamkiem energii niezbędnej do obróbki radiacyjnej. Zaznacza się to szczególnie wyraźnie jeżeli ogrzewanie przeprowadza się nie elektrycznie ale spalając pierwotne nośniki energii. Pomija się wtedy spalanie węgla i produkcję prądu elektrycznego, niezbędnego w przypadku sterylizacji radiacyjnej. W zakładach General Hospital Supplies (USA) sterylizację termiczną przeprowadza się ogrzewając komory gazem ziemnym.

Aspekt energetyczny nie jest jednak jedyną różnicą obydwu technik z punktu widzenia kosztów. Obróbka radiacyjna wymaga stosowania kosztownych zużywających się części. Na przykład liniaki wymagają klustronów kosztujących około 30 tys. USD. Elementy te działają średnio tylko 2 tys. godzin bez konieczności wymiany. Magnetrony nie są wiele tańsze. Sterylizatory termiczne nie mają oczywiście kosztownego odpowiednika klustronu lub magnetronu.

Całość inwestycji akceleratorowej jest o około trzy rzędy wielkości droższa niż instalacji do sterylizacji termicznej. Nie tylko więc energia, ale i dwie pozostałe grupy kosztów muszą być brane pod uwagę dla pełnego porównania. Mnożniki wypadają tak duże, że opłacalna obróbka radiacyjna może mieć miejsce tylko w stosunku do materiałów najwyższej ceny i to w przypadkach, gdy żadna inna metoda nie może być skutecznie i bezpiecznie zastosowana.

Jeżeli wszystkie elementy kalkulacji są jasne, obliczalne i sprawdzalne, to skąd biorą się nieporozumienia? Pierwszą przyczyną są tendencyjne przedstawiania kosztów przez firmy produkujące akceleratory. Odnoszą one często wydajność obróbki do mocy samej wiązki, nie wspominając o tym ile energii i nakładów inwestycyjnych trzeba włożyć w jej uzyskanie. Duże zamieszanie wywołała znana i szanowana firma Sulzer [10], sugerując błędnie wydatki energetyczne niższe o dwa rzędy wielkości od rzeczywistych.

Pomijam cały szereg wypowiedzi osób pracujących w dziedzinie obróbki radiacyjnej, których ścisłość łatwo podważyć. Korzystnie

odbijają na tym tle wypowiedzi w wydawnictwie NABA [11]. Dotyczą one jednak obliczeń kosztów obróbki radiacyjnej materiałów z natury drogiej, przy których koszt napromieniowania nie odgrywa dużej roli. Jeder przypadek dotyczy napromieniowania ścieków, która to obróbka musi być i tak dotowana. Jest rzeczą charakterystyczną, że cytowany tom nie zawiera ani jednej wypowiedzi na temat kosztów obróbki żywności, w której element kosztów napromieniowania jest czynnikiem krytycznym [12]. Pewnym niedostatkiem publikacji NABA jest brak wypowiedzi na temat metodyki obliczania wydajności od początku, t.zn. od punktu poboru prądu, tak by każdy zainteresowany mógł przeprowadzić obliczenia dla dowolnego akceleratora. Zaniżone wydajności przeniknęły niestety do opracowań urzędniczych, np. w Department of Commerce [13]. Można spotkać się też z praktyką przeliczania mocy promieniowania gamma na kilowaty. Daje to oczywiście zupełnie fałszywy obraz sytuacji, choć nakłady energetyczne wypadają nadzwyczaj korzystnie. Obliczenie rzeczywistych kosztów energetycznych napromieniowania gamma jest możliwe, choć bardzo skomplikowane. Najprostszą drogą dla stosującego obróbkę radiacyjną przy użyciu kobaltu 60 jest przyjęcie aktualnej ceny światowej tego izotopu odpowiednio konfekcjonowanego, a dalej kosztów instalacji i jej eksploatacji, kosztów wymiany i uzupełniania kobaltu, wraz ze skomplikowanym transportem olbrzymich pojemników ołowianych, dalej kosztów energetycznych oczyszczania i pompowania wody w basenie i t.d.

Oprócz metody termicznej, konkuruje z sterylizacją radiacyjną inna metoda "zimna", mianowicie sterylizacja gazowa tlenkiem etylenu. Jest ona jednak doskonale porównana, także pod względem wydajności z metodą radiacyjną, również w piśmiennictwie polskim [14] i dlatego nie ma potrzeby wracania do niej w tym raporcie.

7. LITERATURA

1. Z.P.Zagórski, Radiation processing in some Central-East European countries: an area report, *Radiat. Phys. Chem.* 35, 865 (1990).
2. Z.P.Zagórski, Technika Radiacyjna, OIoeJ, Warszawa 1972.
3. Z.P.Zagórski, Sterylizacja radiacyjna, PZWL Warszawa 1981.
4. Z.P.Zagórski, Możliwości technologiczne akceleratora liniowego elektronów, *Postępy Techniki Jądrowej*, 12, 601 (1968).
5. Z.P.Zagórski, Dependence of depth-dose-curves on the energy spectrum of 5-13 MeV electron beam, *Radiat. Phys. Chem.* 22, 409 (1983).

6. Prospekt firmy Scanditronix (Stockholm) oraz referat na 7th INRP, The EB 10 MeV, 30 kW electron irradiation facility, *Radiat. Phys. Chem.* **35**, 670 (1990).
7. M. Saylor, Developments in radiation equipment including the application of machine generated X-Rays to medical product sterilization, referat na *International Kutner Memorial Conference on the Sterilization of Medical Products*, Moskwa 1989.
8. Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 1985, *Centrum Informatyki Energetyki*, Warszawa 1986.
9. J. Ciborowski, "Inżynieria Chemiczna", wyd. II, PWT W-wa 1955.
10. Anonim w *Sulzer Technical Review* 2/1980.
11. "Technical and Economic Comparison of Irradiation and Conventional Methods" 1986, IAEA-TECDOC-454, Vienna 1988.
12. Z. P. Zagórski, *Radiat. Phys. Chem.* **35**, 273 (1990).
13. R. Mentzer-Morrison, An Economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food *United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Technical Bulletin Number 1762*, Washington 1989.
14. Z. P. Zagórski, *Postępy Techniki Jądrowej* **21**, 819 (1977).