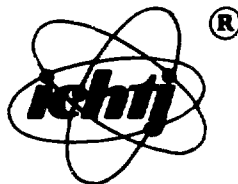


ZBIGNIEW PAWEŁ ZAGÓRSKI

**WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE
ŹRÓDEŁ DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ**

INCT-2157/VII



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

ZBIGNIEW PAWEŁ ZAGÓRSKI

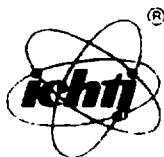
**WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE
ŹRÓDEŁ DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ**

ZBIGNIEW PAWEŁ ZAGÓRSKI

**WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE
ŹRÓDEŁ DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ**

INCT-2157/VII

Wydanie II poprawione i uzupełnione



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

WARSZAWA 1993

KOMISJA REDAKCYJNA

Antoni Dancewicz (przewodniczący), Barbara Andrzejak, Antoni Kalicki, Joachim Kierzek, Bronisław Machaj, Ewa Milner, Jerzy Narbutt, Halina Polkowska-Motrenko, Tadeusz Urbański, Ewa Godlewska (sekretarz)

RECENZENCI I wyd.

prof. dr Przemysław Hoffmann

prof. dr inż. Władysław Pękała

OPRACOWANIE GRAFICZNE

Stanisław Tyborowski

DRUK:

Zakład Poligraficzny mgr inż. Piotr Włodarski

Warszawa, ul. Ksawerów 21

tel. 43-14-71 w. 240

Wydajności 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: liniaki o energii elektronów do 13 MeV i dobrej uniwersalności oraz akceleratory o energiach poniżej 2 MeV, bardziej wydajne energetycznie, lecz o ograniczonych zastosowaniach. Przedstawione obliczenia są w dużej mierze konfrontacją założeń autora, które doprowadziły do konstrukcji i eksploatacji akceleratora LAE 13/9. Założenia i studia przeprowadzone w drugiej połowie lat sześćdziesiątych wykazały swą słuszość w następnych 25 latach. Należy zdawać sobie sprawę, że z włożonej mocy elektrycznej 200 kW otrzymuje się na transporterze zaledwie około 6 kW wiązki odchylonej i przemiatającej. 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 przemiatań i pomiędzy 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. w trakcie 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. Specjalną uwagę zwrócono na zależność pomiędzy wydajnością obróbki radiacyjnej a stosunkiem: maksymalnej do minimalnej dawki w obiekcie. Stosunek ten winien być utrzymywany na najwyższym dopuszczalnym poziomie w celu uzyskania najlepszych rezultatów ekonomicznych. 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. We wszystkich elementach wpływających na wydajność technologiczną źródeł wskazano na próby nowych rozwiązań, które zmierzają do polepszenia sytuacji na omawianym odcinku.

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 energetical 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 25 years of exploitation of the machine. One has to realize that from the 200 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 idle 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 specific 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 technologies, which make possible a control of the shape of the processed object are stressed. Special attention is focused to the relation between the yield of processing and the ratio between the maximum to the minimum dose in the object under the irradiation. The ratio has to be kept on the highest permissible level to obtain best economical results. 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. All elements influencing the technological yield of radiation processing are discussed in view of recent innovations which may improve the actual situation.

Технологическая эффективность источников для радиационной обработки

Отчёт предназначен для тех, кто планирует 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 энергетической точки зрения, но применение которых ограничено. Представленные расчеты являются в большой мере сопоставлением предположений автора, которые привели к построению и эксплуатации ускорителя LAE 13/9. 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 приготвления образцов и ограничениям их эффективной толщины из-за потери в крайних положениях пучка и в положениях между коробками, а также потери на время настройки устройства и на дозиметрические измерения. Экономические эффекты применения ускорителей с меньшей энергией могут быть лучше 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 в 2-3 раза лучше, чем в случае линейных ускорителей. Уделено внимание технологической эффективности преобразования электронного пучка на проникающее тормозное излучение, подобное гамма-излучению. Подчеркнуты достоинства технологии, которые дают возможность регуляции формы объекта облучения. Указано 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	11
2. WYDAJNOŚCI TECHNOLOGICZNE ŹRÓDEŁ GAMMA	12
3. ŹRÓDŁA AKCELERATOROWE DO OBRÓBKİ RADIACYJNEJ	14
3.1. Akceleratory liniowe	14
3.2. Teoretyczna i rzeczywista wydajność liniowego akceleratora elektronów	16
3.3. Akceleratory elektronów poniżej energii 2 MeV i mocy dziesiątek kilowatów w wiązce	24
4. KONWERSJA WIĄZKI ELEKTRONOWEJ NA ELEKTROMAGNETYCZNE PROMIENIOWANIE X (HAMOWANIA)	25
5. NIEKTÓRE DODATKOWE ASPEKTY TECHNOLOGICZNE	27
6. WNIOSKI I REGUŁY OSZACOWANIA WYDAJNOŚCI OBRÓBKİ RADIACYJNEJ	29
7. LITERATURA	32

1. WSTĘP

W raporcie omówiono realne wydajności wielkich źródeł promieniowania jonizującego stosowanych do obróbki radiacyjnej. Przyjęło się we wszystkich językach podkreślanie właśnie określenia "wielki", gdyż tylko duże ilości energii promieniowania, równoważne tym jakie dają tony radu, mogą dać skutki znaczące ekonomicznie. Promieniowanie jonizujące jest mierzalne już w nieznacznym ilościach, bo uruchamia czułe detektory i liczniki. Czułość tych urządzeń polega na celowym wykorzystaniu zjawisk powielających, np. lawinowego zwiększenia liczby jonów w gazie lub wywoływania chemicznego emulsji 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 cezury umowne, które zaproponowano na 7th International Meeting on Radiation Processing (Siódma Międzynarodowa Konferencja Obróbki Radiacyjnej) w roku 1989 i które zostały bez protestów przyjęte 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 najprawdopodobniej do roku 2000 nie będzie. Powodem jest:

- brak krajowego kobaltu-60;
- złe kapsułowanie rosyjskiego kobaltu-60, aby mógł pracować przez co najmniej 15 lat w źródłach ze schronem wodnym:

a wreszcie

- kosztowna dostępność dobrych źródeł kobaltu-60 (z Kanady).

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 Europy Środkowo-Wschodniej [1], a projekty rozwojowe są pomyslane.

Motywacją sporządzenia tego raportu jest m.in. chęć poinformowania chemików radiacyjnych przygotowujących technologię radiacyjną o wydatkach energetycznych niezbędnych na przewidywaną produkcję. Zużycie energii w badaniach poznawczych, np. wykonywanych 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

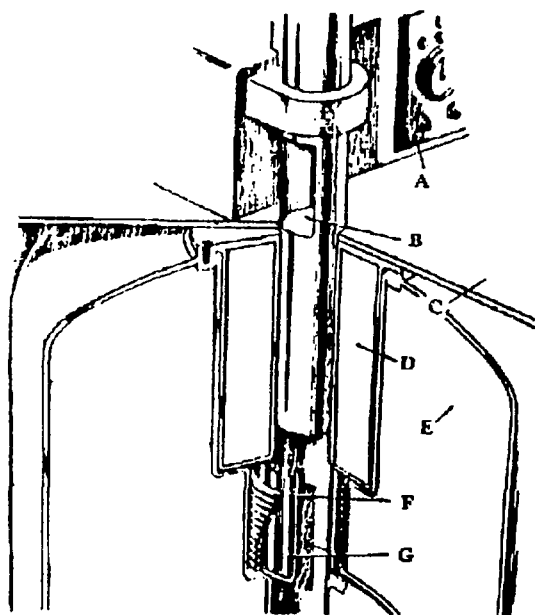
radiacyjnej są niemałe i dlatego wskazane jest dokonanie odpowiedniej analizy już w początkowej fazie badań. Obliczenia takie mogą być wykonane przy określaniu wymaganej dawki, stopnia jej jednorodności oraz gabarytów obiektu poddawanego obróbce, a także wielkości produkcji w skali rocznej. Spojrzenie 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 cezem-137 zostało zarzucone z powodu niemożności uzyskania bezpiecznej formy chemicznej tego nuklidu. Chlorek cezu jest zbyt ryzykowny ze względu na łatwą rozpuszczalność w wodzie. Źródła z wypalonym paliwem jądrowym są niepraktyczne z powodu ciągłej zmiany energii promieniowania i jego mocy.

To, że w ogóle wspominam źródła gamma, wynika z konieczności pokazania, że źródła laboratoryjne z samej zasady nie mogą mieć znaczenia przemysłowego, a 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



Rys.1. Przekrój źródła typu Hotspot lub podobnych wg [2].

A - tablica kontrolna, B - komora napromieniowań, C - płyta przygotowania próbek, D i E - osłony ołowiane, F - spirala z wodą chłodzącą, G - cylindry z Co-60.

większości energii. Rys.1 przedstawia komorę napromieniowań w popularnym źródle Gammacell 220, Hotspot lub zbliżonym rosyjskim Issledowatielu. Pola promieniowania w komorze opisane izodozami są dość jednorodne. Niestety, 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 gorszymi od źródeł typu Gammacell są

źródła onkologiczne, tzw. bomby kobaltowe. W źródłach tych operuje się skolimowaną wiązkę promieniowania gamma, wyciętą z pełnego kąta bryłowego, w który promieniuje izotopowo kobalt-60. Tak duże straty energetyczne służą jednak celom wyższym, tzn. terapii nowotworów i koszty nie odgrywają roli.

Jasną jest rzeczą, że pełniejsze wykorzystanie promieniowania uzyskać można tylko przez umieszczenie obiektów nie wewnątrz koszyka ze źródłami, lecz wokół nich. Dwa źródła, skonstruowane w latach sześćdziesiątych w Zakładzie Chemii Radiacyjnej b. Instytutu Badań Jądrowych w Warszawie, umożliwiają takie eksperymenty. Również laboratoryjne źródło w Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej wręcz zakłada ustawianie próbek wokół centralnego koszyka. Są to jednak próby raczej rozpaczliwe, bo połączone z koniecznością wielokrotnego przekładania obiektów, by uzyskać dawkę z dopuszczalnym stopniem niejednorodności.

Dopiero *par excellence* przemysłowe źródła z kobaltem-60 mogą zapewnić efektywne wykorzystanie promieniowania. Energia zmagazynowana 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 płaski 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 γ i uzyskania równomierności dawki. W ten sposób wydajność procesu można podnieść do 30%, jeżeli urządzenia mechaniczne są niezawodne i praca zorganizowana jest tak, że zapewnia 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. Do tej pory nie pojawiła się konkurencja, zniechęcona subwencjonowaniem Nordionu przez rząd kanadyjski, co psuje rachunek ekonomiczny i działanie ręki rynku.

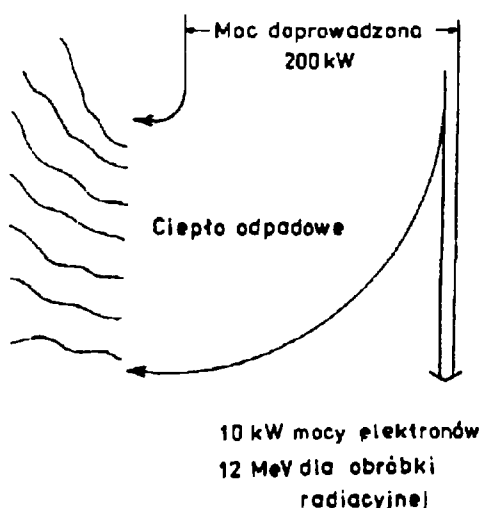
Jakkolwiek w Polsce nie ma widoków na źródła przemysłowe γ to jednak są one, choć w niewielkim stopniu, stosowane w krajach Europy Środkowej i Wschodniej. Dla pełnego obrazu wydajności technologicznej źródeł podać można przykład węgierski. W przedsiębiorstwie Agroster w Budapeszcie pracuje bez przerwy przez całą dobę źródło z kobaltem-60 o aktywności ok. 7,0 PBq czyli 189 kCi (marzec 1993). Co dwadzieścia minut transporter przesuwa skokowo łańcuch 50 worków, np. z pieprzem po 50 kg każdy. Obiekt okrąża źródło otrzymując dawkę średnią ok. 5 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 poziom ok. 20 Ci/g jest wystarczający.

Aktywność taką można uzyskać w wyniku trzyletniego przebywania wsadu w reaktorze, w słabym strumieniu neutronów. Projekty produkcji kobaltu w reaktorze energetycznym nie zostały do tej pory, o ile wiadomo, zrealizowane. Zmniejszenie zapotrzebowania na obróbkę promieniowaniem gamma spowodowało, że wystarcza drobne uzupełnianie kobaltem rosyjskim (kobalt znajduje się tu w schronie suchym).

Zamknięcie źródła kobaltowego zbudowanego w b. NRD specyficznie do napromieniowania cebuli, było spowodowane niekonkurencyjnością obróbki radiacyjnej w porównaniu z innymi środkami przeciw kiełkowaniu (np. spryskiwanie roztworem hydrazynu kwasu maleinowego) oraz zakazem obróbki radiacyjnej obowiązującym w Niemczech. Pozostały więc tylko doświadczenia węgierskie, bardzo pouczające dla rozważających budowę podobnych źródeł w Polsce. Długoletnie doświadczenie Beli Kálmána, założyciela i dyrektora Agrosteru pokazuje, że typowy materiał o ciężarze nasypowym $0,6 \text{ g/cm}^3$ (np. przyprawy suche sproszkowane) otrzymuje dawkę najniższą 5 kGy , a w miejscach maksymalnych 9 kGy , co oznacza współczynnik niejednorodności dawki $1,8$ i $10,3\%$ wykorzystania promieniowania. Inny materiał o małym ciężarze wypełnienia przestrzeni $0,1 \text{ g/cm}^3$ (np. korki do butelek z winem) otrzymuje dawkę 5 kGy , w miejscu maksymalnego napromieniowania 6 kGy (współczynnik $1,2$) ale tu wykorzystanie promieniowania wynosi już tylko 5% . Mimo że głównymi źródłami dla obróbki radiacyjnej w innych krajach Europy Środkowo-Wschodniej są akceleratory, doświadczenia węgierskie są pilnie śledzone.

3. ŹRÓDŁA AKCELERATOROWE DO OBRÓBKİ RADIACYJNEJ

3.1. Akceleratory liniowe



Przegląd źródeł pod kątem ich wydajności rozpoczynamy od akceleratorów liniowych, od których zaczęła się obróbka 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 opublikowano jeszcze w fazie projektowej, okazały się one stale aktualne w ciągu następnych 25 lat. Dziś jawią się one jako nieco zbyt

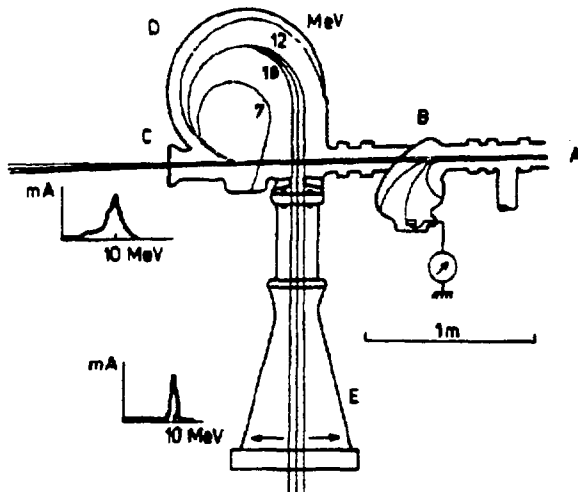
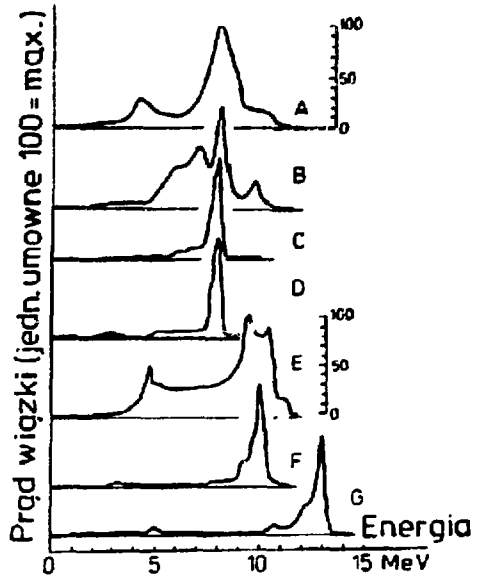
Rys.2. Bilans energetyczny akceleratora liniowego elektronów.

Rys.3. Wybór widm energetycznych elektronów akceleratora LAE 13/9 [5].

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 i G - 13 MeV, 5,5 μ s strojenie rutynowe dla obróbki radiacyjnej.

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 LAE 13/9, wykonanego w latach 1968-1970 według naszych założeń jako prototyp w Instytucie im. Jefremowa (ZSRR). Żaden 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 Risø National Laboratory w latach 1963 i 1965. Obecnie instalacja duńska jest gruntownie przerobiona przez firmę amerykańską Haimson.



Rys.4. Separacja magnetyczna elektronów różnych energii w czasie odchylenia.

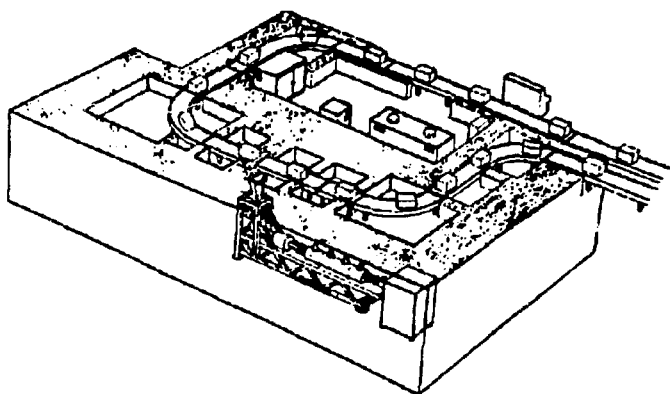
A - wiązka pierwotna elektronów, B - elektromagnes odchyłający elektrony w celu pomiaru ich energii, C - wylot wiązki prostej przy niezasilanych elektromagnesach, D - elektromagnes odchyłający elektrony o 270°, E - tubus odchyłonej wiązki przemieszczanej.

Na małych wykresach podano widma wiązki prostej i odchyłonej.

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 haracz płacony za uzyskiwanie dość przenikliwej energii jonizującej, niestety nie dającej się unikać.

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.

Moce 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, 380/220 V). Nawet jeżeli oferta



Rys.5. Rysunek poglądowy instalacji liniaka Scanditronix [6].

jest w pełni wiarygodna, to konstrukcja ta nie oznacza przełomu w wydajności liniaków - tych najbardziej uniwersalnych w zastosowaniach akceleratorów. Nie ukazały się, o ile wiadomo, do tej pory publikacje konfrontujące przewidywania z rezultatami.

Dla realnych warunków bezpieczniej 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 odchyłania wiązki technologicznej przy odzyskiwaniu pełnej mocy w wiązce prostej do badań poznawczych podjęto w projekcie wstępnym, kierując się przekonaniem, że głównym zadaniem akceleratora w instytucie 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 odchyłanie wiązki (rys.5). Drugą przyczyną było ułatwienie operacji prostowania wiązki odchylonej 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 kW i energii 10 MeV, wykupionej później przez międzynarodowy oddział firmy Raychem. Urządzenie to jest elementem produkcji wyrobów termokurczliwych.

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 dostroić. Maksymalne

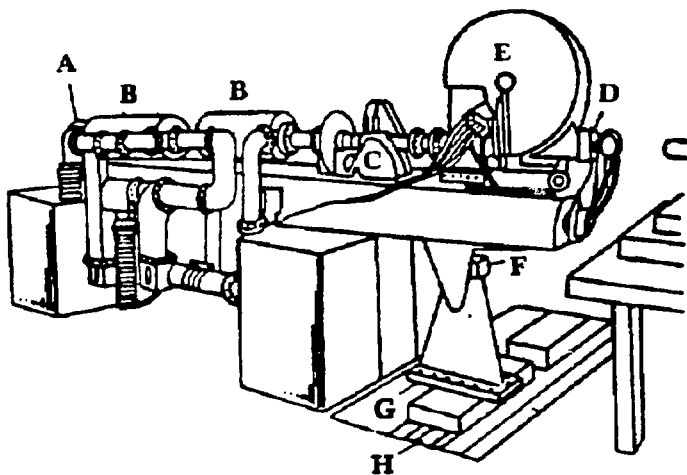
parametry często powodują niestabilną pracę i nieraz od razu decydujemy się na parametry gorsze. Ustalanie warunków pracy odbywa się codziennie po uruchomieniu instalacji i osiągnięciu równowagi termicznej, a rezultatem jest pomiar natężenia prądu wiązki elektronowej. Prąd wiązki mierzony jest poprzez 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 odchylającego 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 mA dla energii 10 MeV i impulsów 5,5 μ s 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 elementy wymieniane dopiero przy generalnych remontach, jak: elementy "struktury" przyspieszającej, pompy tytanowe do wytwarzania próżni i inne. Elementy te osiągnęły już ceny światowe.

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

Większość przypadków obróbki radiacyjnej wymaga wiązki o geometrii szerokiej, zapewniającej równomierne napromieniowanie dużych paczek z materiałem uszlachetnianym (rys.6).

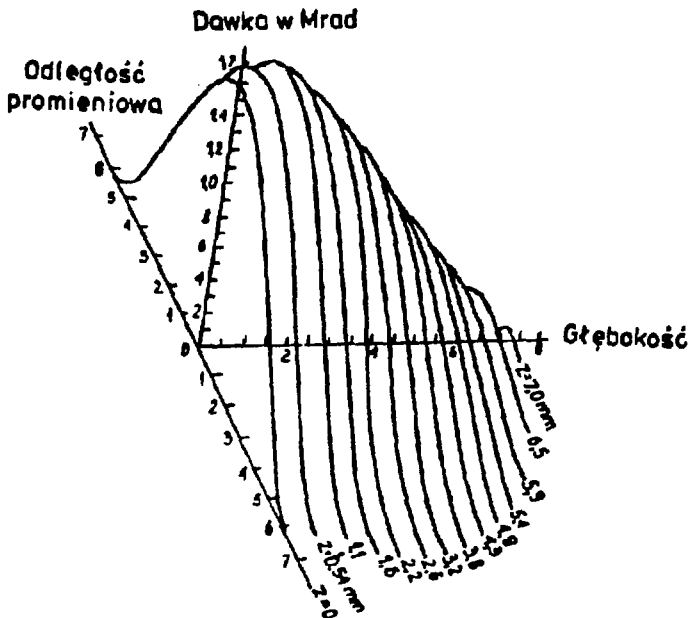
Użytkuje ją przez odchylenie i przemiatanie. Nie dzieje się to za darmo i jest związane ze stratą około 20% mocy. Można to obiektywnie zmierzyć, umieszczając pod dużym oknem wylotowym elektronów specjalny kolektor prądu wiązki, dłuższy niż szerokość przemiatania. W celach praktycznych stosuje się pomiar prądu zbieranego przez ciekłą folię, skalibrowaną dozymetrycznie w stosunku do pełnej absorpcji wiązki przez pochłaniacz grafitowy.

Jak widać, z włożonych 200 kW mocy pozostaje nam na transporterze ok. 5 kW. Jest to jednak dopiero



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

A - działo elektronowe, B - sekcje przyspieszające, C - elektromagnes odchylający wiązkę w celu pomiaru energii, D - okno wiązki prostej, E - elektromagnes odchylający wiązkę dla obróbki radiacyjnej, F - elektromagnes przemiatający wiązkę, G - okno elektronów technologicznych, H - transporter obiektów obróbki radiacyjnej. Po prawej czoło stanowiska do badań na wiązce prostej.



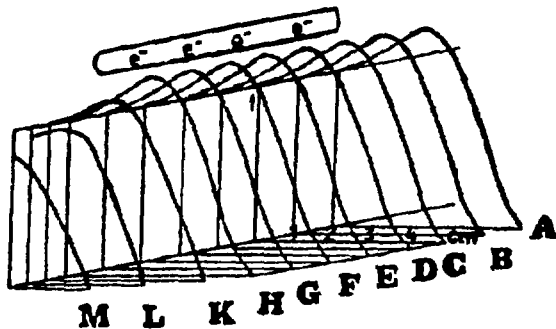
Rys.7. Rozkłady dawek od wiązki prostej elektronów w wodzie.

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

szersze wiązki światła analizującego, które 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.

Produkt musi być napromienowany 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 głębiniowej jest więc stracony, a stanowi on około 30-40% mocy, za-

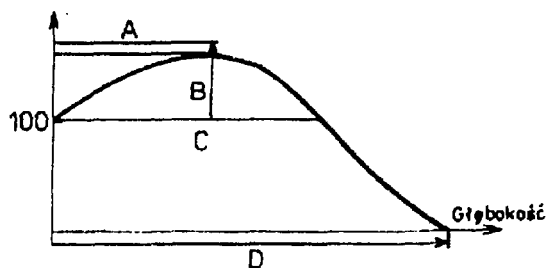


Rys.8. Rozkład dawek głębiniowych od wiązki przemiatanej.

leżnie od energii elektronów i charakterystyki absorpcyjnej materiału. Nie rozważamy tu zniekształceń krzywej głębinyowej na skrajach przemiatań. Z tego powodu wspomniany liniak Scanditronic wyposażony jest w elektromagnesy prostujące wiązkę elektronów do położenia prostopadłego względem transportera.

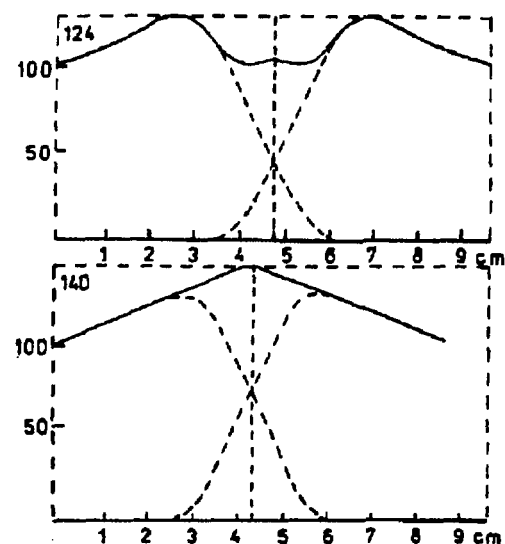
Niezależnie od tego, wiązka odchylona i przemiata na nie może być wykorzystana na skrajach przemiatań, co wynika z rysunku 8. Te skrajne części frontu napromieniowującego muszą być też odcięte, co powoduje dalsze 15% strat.

Duże straty na odciętym "ogonie" krzywej pochłaniania (rys.9) skłaniały wielokrotnie do propozycji napromieniowania dwustronnego (rys.10). Miało to powodować nie tylko pełniejsze wykorzystanie mocy wiązki, ale i powstanie możliwości napromieniowania znacznie grubszej warstwy materiału niż by to wynikało z krzywej 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 nie pokrywa się, jak widać, z krzywą dawki. W normalnej obróbce radiacyjnej, trzymając się reguły "dawka wejścia równa dawce wyjścia", nie dopuszczamy do zatrzymania krytycznej ilości ładunku. W napromieniowaniu dwustronnym natomiast przechwytyjemy pełną ilość wstrzykniętych elektronów i w efekcie łatwo następuje w tworzywach sztucznych rozładowanie elektryczne połączone z wypaleniem dziur w napromieniowanym materiale. Przewodnictwo elektryczne poszczególnych napromieniowanych polimerów różni się znacznie między sobą. Najlepsze jest w przypadku poli(chlorku winylu), z oczywistych przyczyn. Gwałtowne



Rys.9. Parametry dawki głębinyowej.

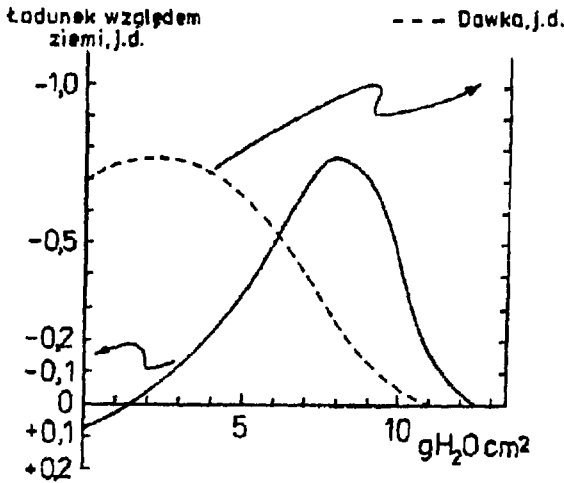
A - głębokość dawki maksymalnej, B - różnica pomiędzy dawką maksymalną a dawką wejścia, C - głębokość użyteczna zasięgu wiązki, D - całkowity zasięg elektronów.



rozładowania występują w tych materiałach rzadziej. Jak widać na rysunku 11, napromieniowanie jednostronne eliminuje kłopoty z rozładowaniem, ponieważ maksimum nagromadzenia ładunku przypada na głębokości, gdzie dawka jest już niewielka i przypada poza materiałem; jest w niewykorzystywanym "ogonie" krzywej głębinyowej.

Drugą komplikacją metody napromieniowania dwustronnego okazały się trudności techniczne ładowania transportera

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



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

i możliwości dostarczenia błędnych dawek, praktycznie nie istniejące przy napromieniowaniu jednostronnym. Do napromieniowania dwustronnego 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 dozymetrii wiązki, praktycznie przed każdą zmianą warunków obróbki. Ocena ilościowa potrzebnego czasu jest trudna, ale doświadczenie wykazuje, że trzeba przewidywać na to ok. 10% czasu pracy urządzeń na pełnej mocy.

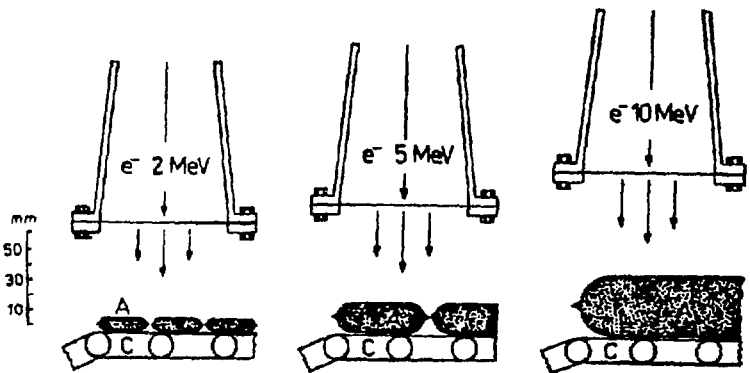
Nie wliczamy tu okresów przeglądów i napraw, ponieważ nie obciążają one czasu biegu akceleratora na pełnej mocy.

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

- Z wiązki prostej liniaka o nominalnej mocy 200 kW otrzymujemy średnio na transporterze, po uwzględnieniu zmniejszonej mocy w skutek zużycia części i głównej straty na odchyłaniu, efektywnie tylko 6 kW.
- Z tej mocy po obcięciu bezużytecznych skrajów szerokości przemiataania uzyskujemy 4 kW.
- Po uwzględnieniu strat wzdłuż transportera (przestrzenie puste pomiędzy skrzynkami i opakowaniami) mamy 3,5 kW.
- Po stratach na specyfice głębinowej pochłaniania mamy już tylko 2 kW.

Wszystkie dane są zaokrąglone, ponieważ wahają się znacznie. Bezpieczeństwo przewidywać każde brać 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 ma-



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

teriału 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 pochłoniętą w masie materiału, wyrażoną w grejach (dżule na kilogram). Odnieśmy rozważania do jednej godziny napromieniowania. Ponieważ 1 Ws 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 wodnistej, jak np. 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 200 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 LAE 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 bardziej pompowanie takiego obiektu. Może mógłby 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.

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 trzeba 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 tyrstorów. Elementy te umieszczone są w dużych odstępach od siebie 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, pięcio- 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.

W toku znajdują się prace na temat powiązania wykorzystania wiązki z tolerowanym współczynnikiem rozrzutu dawki w materiale napromieniowanym. Im większa niejednorodność dawki, tym wykorzystanie wiązki jest lepsze. Jest to taka sama reguła jaka obowiązuje w napromieniowaniach gamma. Nie wchodząc w tym miejscu w szczegóły trzeba zalecać doprowadzanie różnicy pomiędzy dawką maksymalną a minimalną do największej tolerowalności, ograniczonej z jednej strony efektem obróbki radiacyjnej (np. jałowoscia), a wytrzymałością materiału. Przykładem może być mapa dawek w sterylizowanej radiacyjnie bieliźnie operacyjnej, sterylizowanej dwustronnie elektronami 10 MeV w francuskiej firmie Caric. Dawka maksymalna wynosi 47 kGy, a minimalna 28 kGy, jak widać różnica duża, właśnie tolerowalna.

Przedstawione obliczenia można skonfrontować z realnymi kwotami produkcyjnymi akceleratora LAE 13/9 w ostatnich latach. Wyniki są właśnie takie, jak przewidują ostrożne obliczenia. Powinno to być wskazówką dla raczej pesymistycznej kalkulacji przewidywać wyników następnych inwestycji.

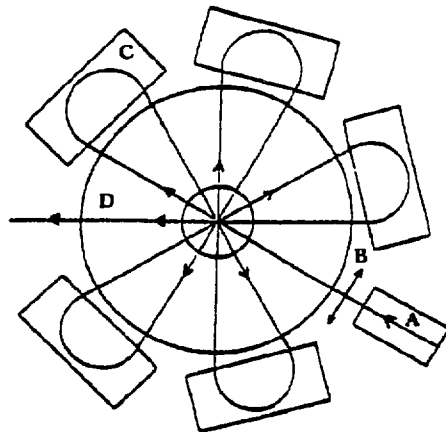
Liniowy akcelerator elektronów LAE 13/9, którego osiągi stały się podstawą powyższych uogólnień, jest u kresu swoich możliwości nie tylko w skutek konieczności służenia oprócz obróbce także badaniom podstawowym, ale również z powodu zmniejszającej się niezawodności, wynikającej z zużycia i konieczności wymiany nawet tych części, które można było uważać za nieulegające zużyciu. Pojawiają się objawy zmęczenia materiałów, a niektóre podzespoły stają się przestarzałe. W roku 1993 została oddana do użytku stacja sterylizacji radiacyjnej wyposażona w inny akcelerator liniowy elektronów, tym razem typu Elektronika (Moskwa) 10-10, czyli 10 MeV, 10 kW. Akcelerator ten, którego opis wraz z całością instalacji, autorstwa Z.Zimka ukaże się w roku 1994 w *Postęпах Techniki Jądrowej*, jest uproszczoną wersją wyżej opisanego LAE 13/9. Uproszczeniem jest zastosowanie magnetronu zamiast klitronu do generowania energii mikrofalowej, za którą płaci się licznymi

niedogodnościami eksploatacyjnymi. Najważniejszą zmianą jest uniknięcie strat mocy na odchylenie wiązki, wyżej obszernie omawiane. Daje to pełne 10 kW mocy wiązki padającej na transporter. Zastosowanie magnetronu i innych rozwiązań konstrukcyjnych pozwoliło zmniejszyć moc zasilania do 120 kW, co jest postępowaniem w stosunku do LAE 13/9. Wiązka elektronów przemiata transporter na szerokość 65 cm. Częstotliwości przemiatań mogą wynosić 1, 2 lub 5 Hz. Wszystkie reguły pakowania materiału, martwych odstępów itd., wyłożone dla akceleratora 13/9, tu pozostają w mocy. Nie można niestety uzyskać wyższych energii niż 10 MeV, co zresztą zabezpiecza przed niezamierzonym podniesieniem energii do wartości groźnych aktywacją.

Lepiej dostosowane do wymogów sterylizacji sprzętu medycznego rozmiary pomieszczeń stwarzają potrzebę wydatku energetycznego na ogrzewanie. W poprzednim rozwiązaniu pomieszczenia były mniejsze, a koszty energii grzewczej w ogóle nie były brane pod uwagę i mieściły się w kosztach ogólnych Zakładu. W nowej instalacji trzeba liczyć się z kosztami ogrzewania budynku o dużej kubaturze. Zwiększone objętości pomieszczeń wynikają z dużej długości transporterów i pomieszczeń na materiały przed i po obróbce. Energia cieplna przeznaczona na ogrzewanie jest duża również z powodu intensywnej wentylacji usuwającej powietrze z domieszką ozonu, wytwarzane w komorze napromieniowań i zastępowane powietrzem świeżym z reszty pomieszczeń.

Niewielka wydajność energetyczna omawianych liniaków może ulec radykalnej poprawie gdy zakończy się sukcesem za granicą montaż nowego typu akceleratora elektronów nazwanego Rhodotronem. Elektrony przyśpieszane są w nim do energii 10 MeV na skomplikowanej drodze kilkakrotnego zawracania do osi komory, po trajektorii zbliżonej kształtem do płatków róży - stąd nazwa od rhodos - róża, rys.13. Firma produkująca te urządzenia, Ion Beam Applications sa w Louvain-la-neuve (Belgia), znana bardziej z produkcji doskonałych cyklotronów, spodziewa się ukończenia tej konstrukcji w roku 1994. W czerwcu 1993 roku autor raportu oglądał tam postępy prac, które znacznie przekroczyły fazę stwierdzenia przydatności koncepcji opracowanej we francuskim ośrodku atomowym w Saclay. Sam akcelerator kształtem odbiega znacznie od przedstawionych na rysunkach liniaków, jednak mimo to mieściłby się w rezerwowej komorze, przeznaczonej na drugi akcelerator, Stacji Sterylizacji w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie.

Przewidywane wydajności energetyczne Rhodotronu są bardzo zachęcające: faza przygotowawcza (generowanie próżni i chłodzenie) wymaga mniej niż 8 kW, bieg jałowy na małej mocy wiązki, pomocny w dozymetrii, centrowaniu wiązki, próbnej obróbce radiacyjnej itp. wymaga 210 kW, a duże moce tzn. 50 kW i 100 kW mocy odpowiednio 290 i 380 kW. Zasilanie systemem z tetrodą jest nie tylko



Rys.13. Schemat ideowy biegu elektronów w Rhodotronie.

A - źródło elektronów (dziątko), B - soczewka magnetyczna, C - elektromagnes odchylający, D - komora przyśpieszeń.

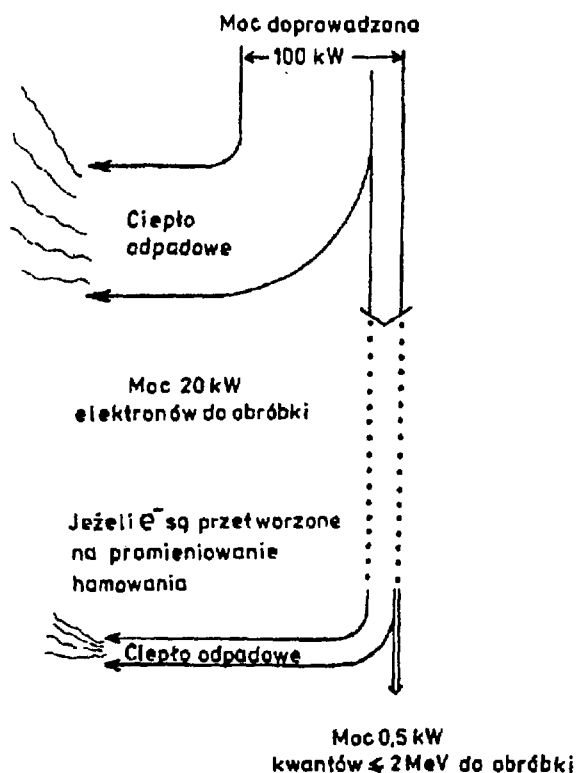
tańsze energetycznie, ale i pewniejsze od klitronowego, a z całą pewnością od magnetronowego. Odginanie wiązki nie wiąże się z dużymi stratami mocy, ponieważ wiązka elektronów z Rhodotronu jest bardziej monochromatyczna (w przeciwnym przypadku wybrany system akceleracji w ogóle nie mógłby działać). Te cechy Rhodotronu czynią przyrząd niezwykle atrakcyjnym tak z punktu widzenia inkorporowania go w instalację do obróbki radiacyjnej, jak i oszczędnej energetycznie eksploatacji (patrz dalej zestawienie z obróbką termiczną), oraz w nowym świetle stawia ewentualne konwersje wiązki na promieniowanie hamowania (patrz dalej). Prace nad Rhodotronem zostały uwieńczone powodzeniem i w dniu 29 października 1993 r., przed terminem, uzyskano pełnej mocy wiązkę.

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

Akceleratory tych energii z reguły pracują z lepszą wydajnością elektryczną, co przedstawia rys.14. Przyczyn tego niesposób wyjaśniać w tym opracowaniu. 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 analogicznie 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, toteż trudno w tym miejscu opisywać, które typy akce-



Rys.14. Bilans energetyczny akceleratora elektronów małych energii, wraz z ewentualną konwersją na promieniowanie elektromagnetyczne.

eratorów niskoenergetycznych mają korzystniejsze obszary mocy i dlatego. 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. Ma to niebagatelne znaczenie w produkcji nie tylko folii, ale i rur termokurczliwych, oraz w sterylizacji sprzętu medycznego. Dla niektórych przedmiotów, np. płytek Petriego energia 1,5 MeV może jeszcze wystarczać, a 1 MeV energii nie wchodzi już w rachubę.

Oprócz folii, oczywistym obiektem napromieniowania są materiały sypkie. Dlatego proszkom poświęca się specjalną uwagę. Są one obiektem napromieniowań 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 płynie poruszającym się transporterze.

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 nastęrczać 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 zakażeń 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 wyłączzonego akceleratora spowodowałoby duże komplikacje eksploatacyjne.

W przypadku najbardziej potrzebnym, tj. 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 uwzględniać 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 podaję, 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. W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej przeprowadzono próby konwersji wiązek elektronowych na tantal.

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 tarczy złotej wynosi 16%, co jest dobrym kompromisem pomiędzy wykorzystaniem bezpośrednim elektronów, a jeszcze tolerowalnym zasięgiem promieniowania hamowania o energii 5 MeV, które zresztą ma 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 przebiciami, 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 żalem trzeba stwierdzić, że przed konferencją nie udało się go uruchomić i demonstrowano jedynie przeźrocza 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]. Następna Konferencja Kilmerowska (czerwiec 1993) znów przyniosła rozczarowanie - nie było wiadomości o eksploatacji omawianego urządzenia.

W małej tarczy konwertera wytwarza się ogromna ilość ciepła. Na przykład, dla przemiataanej wiązki akceleratora 2 MeV oznacza to generację prawie dwudziestu kW mocy na kilkaset zaledwie centymetrach kwadratowych powierzchni. Uzmysłwić to sobie można obrazem dwudziestu kilowatowych kuchenek elektrycznych o powierzchni jednej tylko płytki. Transport ciepła ma oczywiście wartości skończone 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. Ażurowy koszyk metalowy odpowiadający powierzchni pokrywanej przez wiązkę przemiataną został wypełniony ścinkami drucików wolframowych z fabryki żarówek. Pakiet był przedmuchiwany strumieniem azotu, jednak nie udało się uniknąć utlenienia rozgrzanego wolframu, choć chodziło o odprowadzenie tylko 6 kW mocy cieplnej.

Konstruktorzy Rhodotronu (patrz wyżej) obiecują sobie wiele po możliwości konwersji ich ekonomicznych wiązek, jednak będą stali przed podobnymi problemami odprowadzania energii cieplnej, być może nawet większymi.

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). Dodać trzeba, że widmo promieniowania hamowania nie ma niestety tak ostrych linii jak widmo gamma promieniowania kobaltu 60. Widmo promieniowania hamowania opada niemal monotonicznie od maksymalnej energii elektronów do wartości niewielkich. 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 oraz 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 transporter typu wieszakowego przesuwający koszyki linią węża zawracającego trzy razy przed tarczą. Zależnie od rodzaju materiału poddawanego obróbce można zresztą stosować różne warianty przejść obiektu przed napromiennikiem bez istotnych zmian konstrukcyjnych.

Wobec małych wydajności konwersji i komplikacji napromieniowania pojawia się pytanie, czy *skórka jest warta wyprawki*. 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, SO₂ 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 uda 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, tzn. aspekt skali, pojawia się dosyć niespodziewanie w masowej obróbce radiacyjnej. Jeżeli produkt syпки jest dobrze przygotowany, to sprawny załadunek i rozładunek nie nastęrcza trudności. Mogą być wtedy zastosowane znane z technologii operacje podstawowe, np. będące w użyciu we wspomnianych zakładach Columbia dla teflonu i polietylenu. Zracczące 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 w trzech ośrodkach firmy Johnson & Johnson.

Publikowane udziały poszczególnych metod sterylizacji sprzętu medycznego z podziałem na metody stosowane w zakładzie produkcyjnym i w zakładach usługowej sterylizacji niedwuznacznie wskazują, że w pierwszych z nich preferowane są metody termiczne i tlenkiem etylenu, a w drugich sterylizacja radiacyjna. Nic dziwnego, że zakłady małe wolą sterylizować swe produkty w usługowych stacjach sterylizacji, jak np. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej, które przejmują odpowiedzialność za dostarczoną dawkę. Duże zakłady, jak wspomniany J&J stać na różnorodność urządzeń sterylizacyjnych w jednym zakładzie, tym bardziej, że wiele produktów sterylizowanych jest w sposób kombinowany, łączący kilka metod w jeden skuteczny sposób (np. nici chirurgiczne, zwłaszcza resorbowalne).

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, koszty energii elektrycznej i innej itd., pozwalają oszacować przewidywany ostateczny koszt konkretnej obróbki.

W celu przeprowadzenia obliczeń należy znać następujące wartości:

- Dawkę średnią promieniowania potrzebną dla osiągnięcia celu.
- Tolerowalne wartości dawki w miejscach maksymalnego i minimalnego natężenia. Zaznaczyć trzeba, że z przyczyn fizycznych (określony 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.
- Gęstość wagowa i elektronowa materiału. W przypadku materiału porowatego, np. pieprzu suchego, może wystarczyć znajomość ciężaru nasypowego.
- Możliwość formowania materiału: idealna (ciecze i materiały drobnoziarniste), zapewniająca najlepsze dostosowanie się do krzywych dawki głębinowej; ograniczona (materiał średnioziarnisty lub włóknisty); wykluczająca obróbkę (grubość przekraczająca zasięg użyteczny promieniowania).
- Grubość i kształt opakowań.
- Możliwy do uzyskania stopień upakowania wskroś transportera.
- Możliwy do uzyskania stopień upakowania wzdłuż transportera (procent przerw pomiędzy paczkami lub skrzynkami).
- Zamierzony przerób materiału na jedno strojenie akceleratora i ewentualną dozymetrię wybranego reżimu napromieniowania.
- Możliwość ciągłego ładowania transportera (ważne przy małych dawkach, gdy ładowanie może nie nadążać).
- Możliwości transportu i składowania na terenie stacji napromieniowań.

Podawanie w opisach źródeł wielkości rocznych przerobów materiału napromienianego 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 promieniowa-

nia, 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 inaktywują bowiem inne organizmy niż ogrzewanie do temperatur pośrednich. Efekty pasteryzacji, czyli niepełnej sterylizacji termicznej są nieporównywalne z efektami niepełnej sterylizacji radiacyjnej, zwanej czasem raduryzacją.

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 przeciwprądem 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 MAEA [11]. Dotyczą one jednak obliczeń kosztów obróbki radiacyjnej materiałów z natury drogich, przy których koszt napromieniowania nie odgrywa dużej roli. Jeden 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 niedostatkim publikacji MAEA jest brak wypowiedzi na temat metodyki obliczania wydajności od początku, tzn. 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 nierzadziej 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 itd.

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.

O źródłach informacji

Natura omawianych problemów ma wiele elementów komercyjnych, toteż nie zawsze jest ogłaszana w materiałach spełniających cechy publikacji. W dużej mierze opierałem się na tego typu informacjach uzyskanych w kraju i za granicą. Wszystkie te informacje są jednak już w trakcie publikowania i z tego powodu warte były przekazania. Wszystkie są oczywiście sprawdzalne.

Osobnym zagadnieniem są informacje, które zmieniają się, np. ekonomiczne. Do takich należy cena energii elektrycznej. W chwili obecnej cena 1 kWh wynosi w Europie Zachodniej ok. 0,1 USD, w Polsce natomiast tylko 0,05 USD. Ujednoczenie nie nastąpi szybko z powodu ciągle różnej struktury cen i płac.

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, OloEJ, 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 IMRP, The EB 10 MeV, 30 kW electron irradiation facility, *Radiat.Phys.Chem*, **35**, 670 (1990).
- [7]. M.V.C.Saylor, Developments in radiation equipment including the application of machine generated X-Rays to medical product sterilization, referat na *International Kilmer Memorial Conference on the Sterilization of Medical Products*, Moskwa 1989. *Proceedings*, **5**, 327 (1991).
- [8]. Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 1985, Centrum Informatyki Energetyki, Warszawa 1986.
- [9]. J.Ciborowski, "Inżynieria Chemiczna", wyd.II, PWT, Warszawa 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, Possible implication of large scale radiation processing of food, *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, Konfrontacja sterylizacji radiacyjnej z tlenkiem etylenu w odniesieniu do sprzętu medycznego, *Postępy Techniki Jądrowej*, **21**, 819 (1977).

INIS INPUT FORM

From: **POLAND**

Date despatched: **18.06.85**
 Date received:

Enclosed please find INIS input consisting of the following:

Worksheets Diskette Magnetic Tape e-mail

Vol. Ser. No. **p19505**

TRN of Input: **p19500178-p19500199**

Proposed terms

Total number of items (TRNs) included in this input: **22**

Boxes below are to be used for required information on reports submitted with this batch.

Report No.*	Associated TRN	Report No.*	Associated TRN
INCT--2157/7	p19500178		
INP--1616/D	p19500179		
INP--1648/CA	p19500180		

Additional notes:

* Insert INIS-mf for documents with no report number

INIS Section/BCU

INIS Liaison Officer:





Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
Zakład Chemii i Techniki Radiacyjnej
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa
tel.: 11 23 47; telex: 813027 ichtj pl; fax: 11 15 32; e-mail: ichtj/plearn