



PL9801680

Instytut Fizyki Jądrowej,
im. Henryka Niewodniczańskiego
w Krakowie

INP

RAPORT Nr 1778/C

Optymalizacja warunków chłodzenia tarczy bombardowanej
wewnętrzną wiązką protonów w cyklotronie AIC - 144.

Mirosław Szalkowski
Barbara Petelenz



Adresy: 29 - 29

Siedziba główna:
ul. Radzikowskiego 152,
31-342 Kraków.
e-mail: dyrektor@bron.ifj.edu.pl

Zakład Wysokich Energii:
ul. Kawiorów 26 A,
30-055 Kraków.
e-mail: hepsec@chopin.ifj.edu.pl

RAPORT Nr 1778/C

**Optymalizacja warunków chłodzenia tarczy bombardowanej
wewnętrzną wiązką protonów w cyklotronie AIC - 144.**

Mirosław Szalkowski
Barbara Petelenz

Kraków, październik 1997

WYDANO NAKŁADEM
INSTYTUTU FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
KRAKÓW, UL. RADZIKOWSKIEGO 152

Optymalizacja warunków chłodzenia tarczy bombardowanej wewnętrzną wiązką protonów w cyklotronie AIC-144

Wstęp

Jako jedno z zadań uruchamianego w IFJ cyklotronu AIC-144 przewidziano wytwarzanie radioizotopów, które będą wykorzystywane w pracach badawczych prowadzonych w IFJ, a docelowo - również w medycynie nuklearnej. Z przyczyn technicznych zdecydowano, że w tym cyklotronie aktywacje tarcz powinny być prowadzone przede wszystkim na wiązce wewnętrznej, z czego wynika konieczność zaprojektowania i skonstruowania nowoczesnego, zautomatyzowanego stanowiska do otrzymywania radioizotopów, współpracującego z danym cyklotronem.

Założenia użytkowe do konstrukcji takiego stanowiska przedstawiono w opublikowanym wcześniej raporcie¹. Podkreślono tam znany fakt, że w technice akceleracji zawsze pojawia się problem skutecznego odprowadzenia ciepła z elementów konstrukcyjnych bombardowanych wiązką cząstek naładowanych². Problem ten staje się tym trudniejszy, im wyższe energie i prądy wiązki oraz im niższe temperatury topnienia (sublimacji) materiałów tarczowych. Z taką właśnie sytuacją spotkali się projektanci stanowiska, gdyż duże prądy wiązki są jednym z koniecznych warunków otrzymywania radioizotopów z dużą wydajnością, a w zastosowaniach bardzo często ma się do czynienia z niskotopliwymi materiałami tarczowymi, takimi jak metaliczny cynk, kadm lub bizmut^{*)}.

Dążąc do maksymalnego bezpieczeństwa eksploatacyjnego projektowanego stanowiska przeanalizowano problem odprowadzenia ciepła z tarczy, czyli części bombardowanej cząstkami naładowanymi w celu uzyskania pożądanego produktu reakcji jądrowej.

Pierwszy rozdział niniejszego raportu zawiera założenia co do efektywności chłodzenia tarczy przeznaczonej do wytwarzania radioizotopów. W dalszych rozdziałach przedstawiono wyniki obliczeń wymiany ciepła w takim układzie oraz wnioski mogące wpływać na konkretne rozwiązania konstrukcyjne lub eksploatacyjne.

Definicja zadania obliczeniowego:

Rozwiązać problem skutecznego chłodzenia tarczy służącej do otrzymywania radioizotopów na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144.

Przez chłodzenie skuteczne rozumie się nieprzekroczenie granicznej temperatury powierzchni tarczy bombardowanej wiązką cząstek naładowanych o zadanej energii i intensywności.

Tarczę stanowi warstwa metalu naniesionego elektrolitycznie na podkładkę miedzianą. Podkładka z materiałem tarczowym jest zintegrowana z głowicą w sposób umożliwiający bezpośredni kontakt z wodą chłodzącą.

Jako temperaturę graniczną przyjmuje się, ze stosownym marginesem bezpieczeństwa, najniższą z przewidywanych temperatur topnienia (sublimacji) używanych materiałów tarczowych lub spodziewanych produktów reakcji jądrowej, w warunkach ciśnienia resztkowego panującego w komorze próżniowej cyklotronu.

Podsumowując: zadaniem optymalizacyjnym jest obliczenie niezbędnego objętościowego przepływu wody chłodzącej oraz propozycja takiej wewnętrznej konstrukcji głowicy, aby uzyskać kinetykę wymiany ciepła optymalną, czyli zapewniającą nieprzekroczenie zadanych temperatur granicznych na powierzchni tarczy bombardowanej wiązką.

^{*)} z cynku i kadmu otrzymuje się, odpowiednio, Ga-67 i In-111 dla diagnostyki medycznej in vivo. Z bizmutu można otrzymać bezpośrednio izotop terapeutyczny At-211 lub, pośrednio, Bi-207 - cenny izotop do badania zjawiska anihilacji pozytonów.

Definicje danych projektowych:

Przy przewidywanym ciśnieniu resztkowym rzędu $p=10^{-5}$ mm Hg, odpowiednie temperatury topnienia i sublimacji wybranych materiałów tarczowych wynoszą:

$$\text{dla Zn:} \quad T_{\text{subl}}(\text{Zn}) = 180 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{topn}}(\text{Zn}) = 420 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{dla Cd:} \quad T_{\text{subl}}(\text{Cd}) = 160 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{topn}}(\text{Cd}) = 321 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{dla Bi:} \quad T_{\text{subl}}(\text{Bi}) = 425 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{topn}}(\text{Bi}) = 271 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

W dalszym ciągu obliczeń zakłada się, że grubość materiału tarczowego wystarczająca do całkowitego wyhamowania cząstek (zapewnienia maksymalnej wydajności pożądanej reakcji jądrowej) wynosi $\delta_{\text{tarczy}} = 0,5$ mm.

Możliwości optymalnego wykorzystania szerokości wiązki pozwalają na zastosowanie podkładki o wymiarach około 6×3 [cm \times cm], nachylonej w stosunku do osi wiązki o kąt rzędu 5° . Stosunkowo mała przewidywana szerokość połówkowa wiązki powoduje, że dalsze zwiększanie wymiarów podkładki mija się z celem.

Wiązka protonów przyspieszanych w cyklotronie AIC-144 może mieć energię sięgającą 60 MeV i prąd do 100 μ A, co oznacza konieczność odprowadzenia 6000 W ciepła z podkładki i tarczy o podanych wyżej gabarytach (gęstość mocy rzędu 300 W/cm 2).

Danymi projektowymi w znaczeniu danych ruchowych są:

a) konieczna do odprowadzenia moc cieplna wiązki $Q = 6000$ W

b) grubość warstwy materiału tarczowego $\delta_{\text{tarczy}} = 0,5$ mm

c) przewodnictwo cieplne materiału podkładki i tarcz :

$$\lambda_{\text{Zn}} = 112, \quad \lambda_{\text{Cd}} = 44, \quad \lambda_{\text{Bi}} = 8, \quad \lambda_{\text{Cu}} = 330 \quad [\text{W/m/deg}]$$

d) temperatura początkowa wody chłodzącej T_P [$^{\circ}$ C], przy czym należy uwzględnić możliwość okresowych wahań temperatury w zależności od pory roku

e) graniczna temperatura materiału tarczowego - $T_{\text{tarczy}} \leq \begin{cases} 155 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{dla Zn i Cd} \\ 240 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{dla Bi} \end{cases}$

(zostały założone warunki bezpieczne, tj. temperatura sublimacji dla tarczy kadmowej minus $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperatura topnienia dla tarczy bizmutowej minus $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Danymi projektowymi w znaczeniu danych konstrukcyjnych są:

a) zewnętrzne wymiary podkładki z tarczą: 6 cm x 3 cm.

Określenie i wybór zmiennych projektowych:

Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do produkcji izotopów na wiązce wewnętrznej, stosowanych w różnych ośrodkach badawczych,^{3,4,5,6,7,8,9} jak również analiza problemu od strony kinetyki wymiany ciepła i hydrodynamiki przepływu, sugerują konieczność zastosowania w wewnętrznej części głowicy wkładki ograniczającej, zawężającej płynący strumień wody chłodzącej do wąskoszczelinowego kanału. Zapewnia to najefektywniejsze chłodzenie tarczy, bowiem utrzymane są wtedy najlepsze warunki wymiany ciepła. Długość i wysokość tego kanału są bezpośrednio zależne od gabarytów zewnętrznych podkładki oraz od sposobu doprowadzenia wody chłodzącej do głowicy (liczby i przekroju rurek wlotowych i wylotowych). Wymiary te zostają przyjęte i ustalone przez konstruktorów głowicy na podstawie danych projektowych i nie podlegają optymalizacji.

Parametrem (zmienną projektową) podlegającym tym obliczeniom będzie za to szerokość szczeliny powstałego kanału, która z uwagi na to, że może być dobierana w sposób dość swobodny (lecz zależny od ograniczeń konstrukcyjnych), powinna wynikać z analizy cieplnej rozpatrywanego układu i zapewniać optymalne warunki wymiany ciepła.

Następny parametr, który powinien zostać przyjęty jako zmienna projektowa, to wewnętrzna powierzchnia podkładki, bowiem możliwe jest jej rozwinięcie przez zastosowanie ożebrowania¹⁰ (np. przez frezowanie), co ma zasadnicze znaczenie dla wydajności (skuteczności) chłodzenia.

Kolejna wielkość, od której zależy w znaczący sposób kinetyka wymiany ciepła to grubość samej podkładki miedzianej, skąd wniosek, że i ją należy przyjąć jako zmienną projektową.

Reasumując, pełny wykaz zmiennych, których wartości powinny wynikać z analizy warunków optymalnej wymiany ciepła i dopiero na tej podstawie być przyjęte jako dane konstrukcyjne, jest następujący:

- a) szerokość szczeliny kanału między podkładką a wkładką ograniczającą - a [mm]
- b) wewnętrzna powierzchnia podkładki - A [cm²] (dodatkowe zmienne dotyczące gęstości i wymiarów ewentualnego ożebrowania nie były optymalizowane)
- c) grubość podkładki miedzianej - δ_{Cu} [mm]

Poniżej opisano sposób obliczenia i określenia tych wielkości oraz podano wymagane objętościowe natężenie przepływu wody chłodzącej - V [dm³/min] o różnych temperaturach początkowych, zapewniających osiągnięcie wymaganej T_{tarczy}

Wykaz zastosowanych równań wymiany ciepła¹¹:

I. Ustalone przewodzenie ciepła przez ściankę 2-warstwową:

$$Q = \frac{A \cdot (T_{S2} - T_{S1})}{\left(\frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{\delta_{tarczy}}{\lambda_{tarczy}} \right)} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

- gdzie :
- T_{S1} - wewnętrzna temperatura ścianki podkładki (od strony wody chłodzącej)
 - $T_{S2} = T_{tarczy}$ - zewnętrzna temperatura ścianki tarczy (dla uproszczenia przyjęta jako temperatura całej tarczy)
 - $\delta_{tarczy} = 0,5$ mm
 - λ_{tarczy} - odpowiednio dla Cd, Zn lub Bi

II. Bilans cieplny wody:

$$Q = V \times \rho \times C_P \times (T_K - T_P) \quad [\text{W}] \quad (2)$$

III. Wnikanie ciepła od ścianki podkładki (o temp. T_{S1}) do rdzenia wody:

$$Q = \alpha \times A \times \Delta T_{ln} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

gdzie: ΔT_{ln} - logarytmiczny temperaturowy moduł napędowy równy

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_K - T_P}{\ln \frac{T_{S1} - T_P}{T_{S1} - T_K}} \quad [\text{deg}]$$

α - współczynnik wnikania ciepła wyznaczany w oparciu o równanie kryterialne Hausena dla zakresu przepływu przejściowego i burzliwego:

$$\alpha = 0,116 * \frac{\lambda}{d_e} * (Re^{0,67} - 125) * Pr^{0,33} * \left(\frac{\eta}{\eta_s}\right)^{0,14} * \left(1 + \left(\frac{d_e}{L}\right)^{0,67}\right)$$

gdzie:

$$Re = \frac{u * d_e * \rho}{\eta}$$

liczba Reynoldsa

d_e – ekwiwalentna średnica przepływu dla przekrojów niekołowych równa czterem promieniom hydraulicznym przekroju (kanału)

u - prędkość przepływu wody w kanale [m/s]

η - dynamiczna lepkość wody [kg/m×s]

$$Pr = \frac{C_p * \eta}{\lambda}$$

liczba Prandtla dla wody

$$\left(\frac{\eta}{\eta_s}\right)^{0,14}$$

poprawka lepkościowa stosowana dla dużych różnic temperatur między ścianką a rdzeniem płynu,

gdzie $\eta_s = \eta(T_{st})$ – lepkość wody w temp. przyściennej

$$1 + \left(\frac{d_e}{L}\right)^{0,67}$$

simpleks geometryczny, uwzględniający wpływ efektów wlotowych na współczynnik wnikania ciepła, stosowany dla krótkich przewodów. (L – długość kanału)

Algorytm postępowania:

W celu zrealizowania postawionego zadania przyjęto następujący tok postępowania:

- 1) Przez odpowiednie przekształcenia powyższych równań doprowadzono do podania zależności temperatury tarczy od parametrów projektowych.
- 2) Potraktowano powstałą zależność jako funkcję celu i zbadano wpływ zmiennych projektowych na jej wartość.
- 3) Wybrano te zmienne, dla których temperatura tarczy nie przekracza wymaganej T_{tarczy}

Obliczenia wykonano za pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel 5.0 i w związku z tym wszystkie przekształcenia oraz postacie wzorów dostosowano do jego specyfiki.

Ad 1) Wyprowadzenie wzoru na temperaturę tarczy – T_{tarczy} :

a) Z bilansu ciepła (równ.2):
$$T_K = T_P + \frac{Q}{V * \rho * C_p}$$

Ponieważ gęstość i ciepło właściwe wody nie zależą silnie od temperatury, przyjęto wartości średnie, tj.

$$\rho^{15} = 998 \text{ kg/m}^3, \quad C_p^{15} = 4180 \text{ J/kg/deg}$$

b) Średnia temperatura wody chłodzącej:
$$T = 0,5 * (T_P + T_K)$$

c) Przewodnictwo cieplne i lepkość dynamiczna wody (poniższe wzory otrzymano przez aproksymację danych tabelarycznych¹² odpowiednim wielomianem):

$$\eta(T) = 0,001485 - 2,69 * 10^{-5} * T + 1,624 * 10^{-7} * T^2 \quad [\text{kg/m} \times \text{s}]$$

(wzór dla temperatur od 5 °C do 80 °C)

$$\lambda(T) = 0,5526 + 0,00247 \times T - 1,188 \times 10^{-5} \times T^2 \quad [\text{W/m/deg}]$$

e) $d_e = 2 \cdot \frac{a \cdot b}{a + b}$ a – szerokość kanału [m]
 b – wysokość kanału [m]

f) $u = \frac{V}{a \cdot b}$ Prędkość wody w kanale [m/s]

g) $Re = \frac{u \cdot d_e \cdot \rho}{\eta(T)}$

h) $Pr = \frac{C_p \cdot \eta(T)}{\lambda(T)}$

i) $\alpha = 0,116 \cdot \frac{\lambda(T)}{d_e} \cdot (Re^{0,67} - 125) \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_e}{L}\right)^{0,67}\right)$

j) Pierwsze przybliżenie T_{S1} (z równ.3) $T_{S1} = \frac{T_P - T_K \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot A \cdot (T_K - T_P)}{Q}\right)}{1 - \exp\left(\frac{\alpha \cdot A \cdot (T_K - T_P)}{Q}\right)}$

k) Lepkość wody w temp, T_{S1} :

$$\eta(T_{S1}) = - 2,274 \times 10^{-5} + 0,032914 \times T^1 - 0,23946 \times T^2 \quad [\text{kg/m/s}]$$

(wzór dla temperatur $T > 80 \text{ }^\circ\text{C}$)

l) Poprawka lepkościowa na współczynnik wnikania ciepła: $\alpha' = \alpha \cdot \left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_{S1})}\right)^{0,14}$

m) Korekta T_{S1} : $T_{S1} = \frac{T_P - T_K \cdot \exp\left(\frac{\alpha' \cdot A \cdot (T_K - T_P)}{Q}\right)}{1 - \exp\left(\frac{\alpha' \cdot A \cdot (T_K - T_P)}{Q}\right)}$

n) Temperatura tarczy (z równ.1) $T_{S2} = T_{S1} + \frac{Q \cdot \left(\frac{\delta_{Cu}}{330} + \frac{0,005}{\lambda_{tarczy}}\right)}{A} = T_{tarczy}$

Ad 2) Wrażliwość funkcji celu (T_{tarczy}) na zmienne projektowe:

Ten etap obliczeń polegał na wstawianiu wybranych wartości zmiennych, tj. V , A , a , δ_{Cu} do powyższej procedury obliczeniowej i sprawdzaniu odpowiadającej im wartości obliczanej T_{tarczy} .

Przedziały zmienności poszczególnych zmiennych traktowane jako ich ograniczenia dobierane były następująco:

- 1) Szacowano, że natężenie przepływu wody V powinno zawierać się w przedziale $5 - 15 \text{ dm}^3/\text{min}$
 (górne ograniczenie podyktowane jest wydajnością pompy i dążeniem do minimalizacji kosztów związanych z zastosowaniem wytrzymałszych konstrukcyjnie materiałów, np. rurek wodnych)
- 2) Powierzchnia wewnętrzna podkładki – A :
 wartość minimalna wynika z danych projektowych i wynosi 18 cm^2
 wartość maksymalna wynika z realnej oceny możliwości jej rozwinięcia przez ożebrowanie i zależnie od przyjętego sposobu żebrwania (tzn. geometrii żeber, odstępów między nimi) można przyjąć, że nie przekroczy 40 cm^2
- 3) Szerokość szczeliny – a :
 dolne ograniczenie wynosi $1,5 \text{ mm}$, bowiem mniejsza szczelina mogłaby spowodować nadmierny wzrost prędkości przepływu wody w kanale, a co za tym idzie wzrost oporów przepływu.
 górne ograniczenie wynosi 3 mm , bowiem większa szczelina pogarszałaby znacząco kinetykę wymiany ciepła, czyli skuteczność chłodzenia.
- 4) Grubość podkładki miedzianej – δ_{Cu} :
 w tym przypadku kierowano się typowymi handlowymi grubościami blach, przyjmując:
 minimum jako $0,8 \text{ mm}$ (cieńsza blacha mogłaby mechanicznie nie wytrzymać parcia wody)
 maksimum jako 3 mm (konieczne, jeśli przewidujemy wykonanie żeber)

Pełne zestawienie ograniczeń zmiennych jest więc następujące:

$$\begin{aligned} 8,3 \times 10^{-5} &\leq V \leq 2,5 \times 10^{-4} && [\text{m}^3/\text{s}] \\ 1,8 \times 10^{-3} &\leq A \leq 4,0 \times 10^{-3} && [\text{m}^2] \\ 1,5 \times 10^{-3} &\leq a \leq 3,0 \times 10^{-3} && [\text{m}] \\ 0,8 \times 10^{-3} &\leq \delta_{Cu} \leq 3,0 \times 10^{-3} && [\text{m}] \end{aligned}$$

$$\text{z ograniczeniem funkcji celu: } T_{tarczy}^{TP} = f(V, A, a, \delta_{Cu}) \leq \begin{cases} 155^\circ\text{C dla Cd i Zn} \\ 240^\circ\text{C dla Bi} \end{cases}$$

$$\text{dla } T_P = \langle 5, 30 \rangle \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Zasadnicze obliczenia wykonano dla tarczy kadmowej i bizmutowej, gdyż wyniki otrzymane dla tarczy kadmowej mogą być z dużym marginesem bezpieczeństwa zastosowane także do układu z tarczą cynkową.

Poniżej przedstawiono wartości $T_{tarczy} = f(T_P)$ dla przypadków, gdy zmienne przyjmą skrajne wartości wynikające ze swych ograniczeń, w układzie najmniej korzystnym (a) i najbardziej korzystnym (b) z punktu widzenia skuteczności chłodzenia:

a) układ najmniej korzystny:

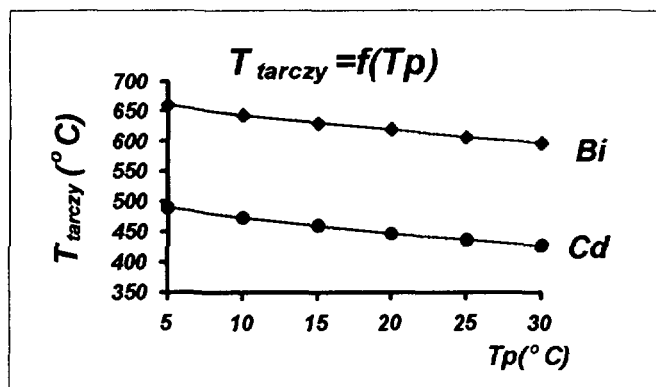
$$V = 5 \text{ dm}^3/\text{min} \quad A = 18 \text{ cm}^2 \quad a = 3 \text{ mm} \quad \delta_{Cu} = 3 \text{ mm}$$

b) układ optymalny:

$$V = 15 \text{ dm}^3/\text{min}] \quad A = 40 \text{ cm}^2 \quad a = 1,5 \text{ mm} \quad \delta_{Cu} = 0,8 \text{ mm}$$

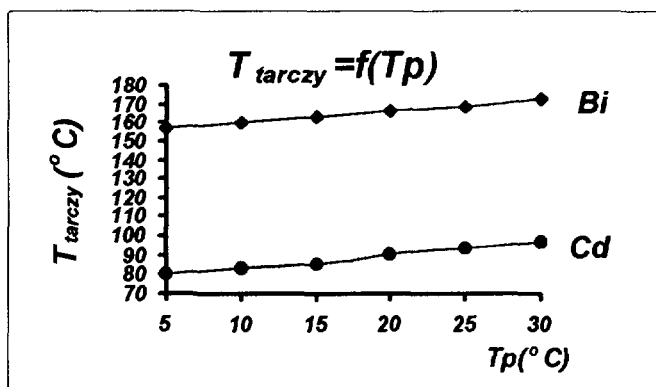
Rys.1. Zależności temperatury tarczy od temperatury początkowej wody chłodzącej:

T_P [°C]	5	10	15	20	25	30
$T_{tarczy}(Cd)$ [°C]	489	474	460	448	437	428
$T_{tarczy}(Bi)$ [°C]	660	644	631	619	608	598



(a) Układ nieoptymalny

T_P [°C]	5	10	15	20	25	30
$T_{tarczy}(Cd)$ [°C]	80	83	86	91	94	97
$T_{tarczy}(Bi)$ [°C]	157	160	163	166	169	173



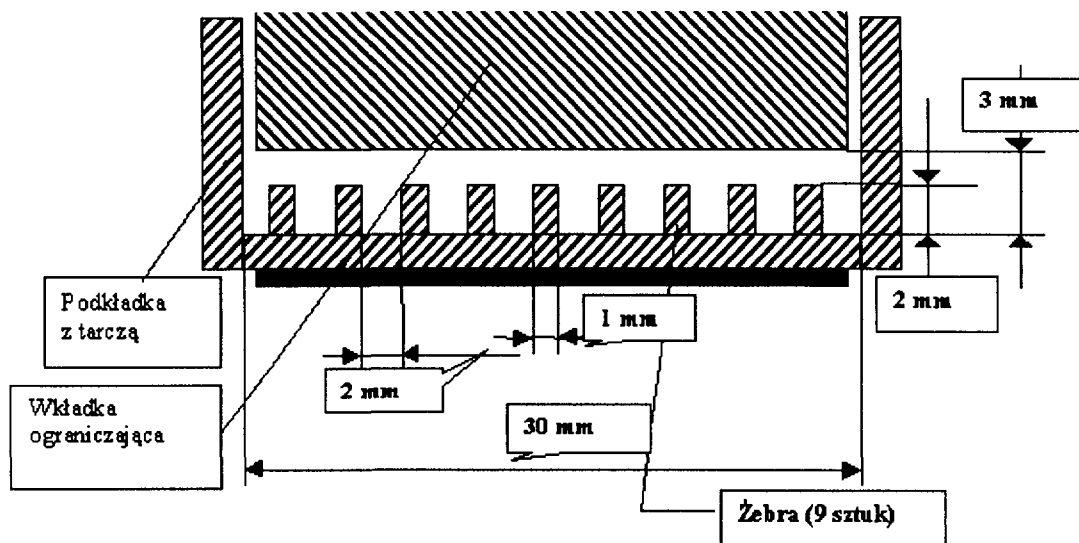
(b) Układ optymalny

Wyniki te pozwalają wyciągnąć wniosek, że uzyskane w przypadku (a) schłodzenie tarczy jest dalece niewystarczające i w związku z tym równoczesne zastosowanie takich wartości zmiennych jest niedopuszczalne. Przypadek (b) wskazuje z kolei, że nie jest konieczne dobieranie zmiennych z zakresu ich górnych wartości, gdyż tak głębokie schłodzenie tarczy nie jest wymagane. Sposób doboru właściwego zestawu tych parametrów opisano w części dalszej. Wykres z przypadku (a) dodatkowo wskazuje, że gdy nie jest wymagane bardzo intensywne chłodzenie tarczy, to efektywność wymiany ciepła można poprawić przez zastosowanie cieplej wody w obiegu chłodniczym. Ten pozorny paradoks wynika z lepszych własności reologicznych wody w wyższych temperaturach, czyli wtedy, gdy między ścianką a rdzeniem strumienia panuje znaczny gradient temperaturowy.

Ad 3) Dobór zmiennych projektowych:

Wielkościami, które w kluczowy sposób determinują skuteczność chłodzenia są przepływ wody oraz powierzchnia podkładki. Z punktu widzenia eksploatacyjnego należy dążyć do stosowania możliwie małych przepływów wody chłodzącej, przy możliwie jak największej powierzchni wymiany ciepła.

Biorąc pod uwagę ograniczenia konstrukcyjne zdecydowano się ustalić wielkość tej powierzchni na równą 30 cm^2 i zaproponować ożebrowanie jak na rysunku poniżej:



Rys. 2. Proponowany profil głowicy tarczowej.

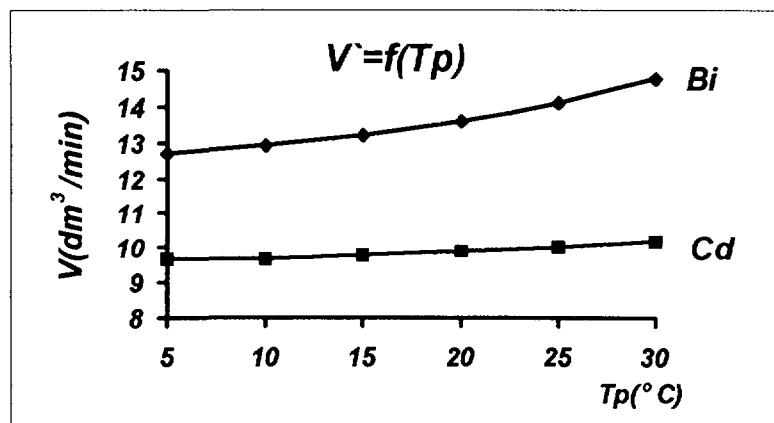
Tak ukształtowana powierzchnia wewnętrzna podkładki determinuje również grubość samej podkładki δ_{Cu} oraz zakres możliwych szerokości kanału, wahających się między 2 a 3 mm. Chcąc uniknąć nadmiernego dławienia przepływu wody zdecydowano się zastosować kanał o szerokości maksymalnej $a = 3 \text{ mm}$.

Po przyjęciu tych wartości zbadano, czy została uzyskana dla nich wymagana T_{tarczy} przy przepływach wody poniżej $15 \text{ dm}^3/\text{min}$. Odpowiedzi te uzyskano rozwiązując równanie:

$$T_{tarczy}^{T_P} = f(V) = \begin{cases} 155 \text{ } ^\circ\text{C dla Cd} \\ 240 \text{ } ^\circ\text{C dla Bi} \end{cases}$$

dla wybranych wartości T_P z przedziału $\langle 5,30 \rangle$ [$^\circ\text{C}$], wykorzystując wbudowane moduły obliczeniowe dostępne w programie Excel 5.0. Poniżej przedstawiono otrzymane wyniki i graficzną ich interpretację:

T_P [$^\circ\text{C}$]	5	10	15	20	25	30
V [dm^3/min] dla Cd	9,7	9,7	9,8	9,9	10,0	10,2
V [dm^3/min] dla Bi	12,7	12,9	13,2	13,6	14,1	14,8



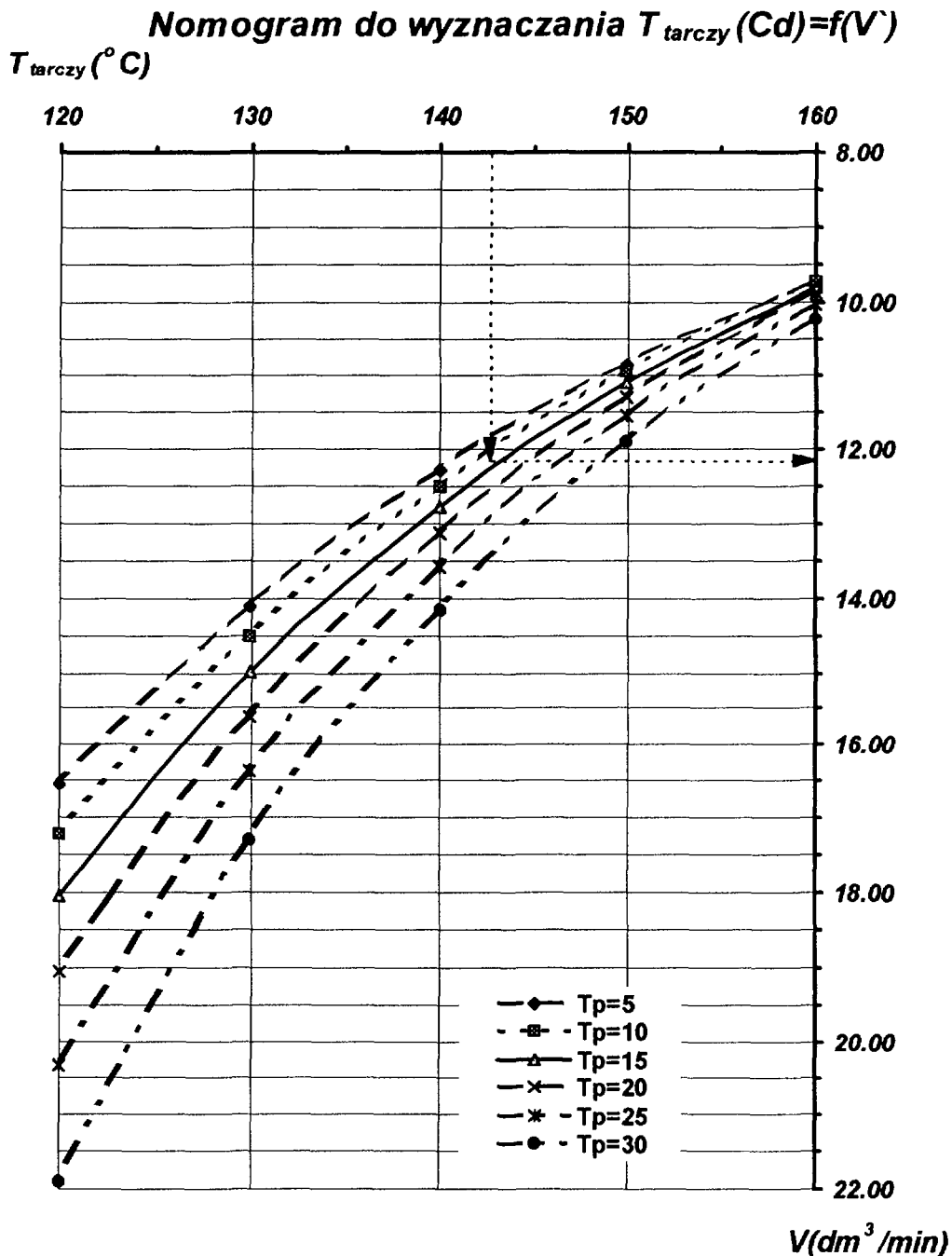
Rys. 3. Zależność przepływu wody chłodzącej od jej temperatury początkowej dla wymaganej T_{tarczy}

Wynika stąd, że przy podanych wyżej wymiarach konstrukcyjnych podkładki przepływ wody konieczny do zapewnienia żądanej temperatury T_{tarczy} jest niższy od $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ i dla tarczy kadmowej nie wykazuje silnej zależności od temperatury początkowej wody T_p . Występująca nieco silniejsza zależność dla bizmutu nie stanowi zagrożenia z punktu widzenia eksploatacji ruchowej.

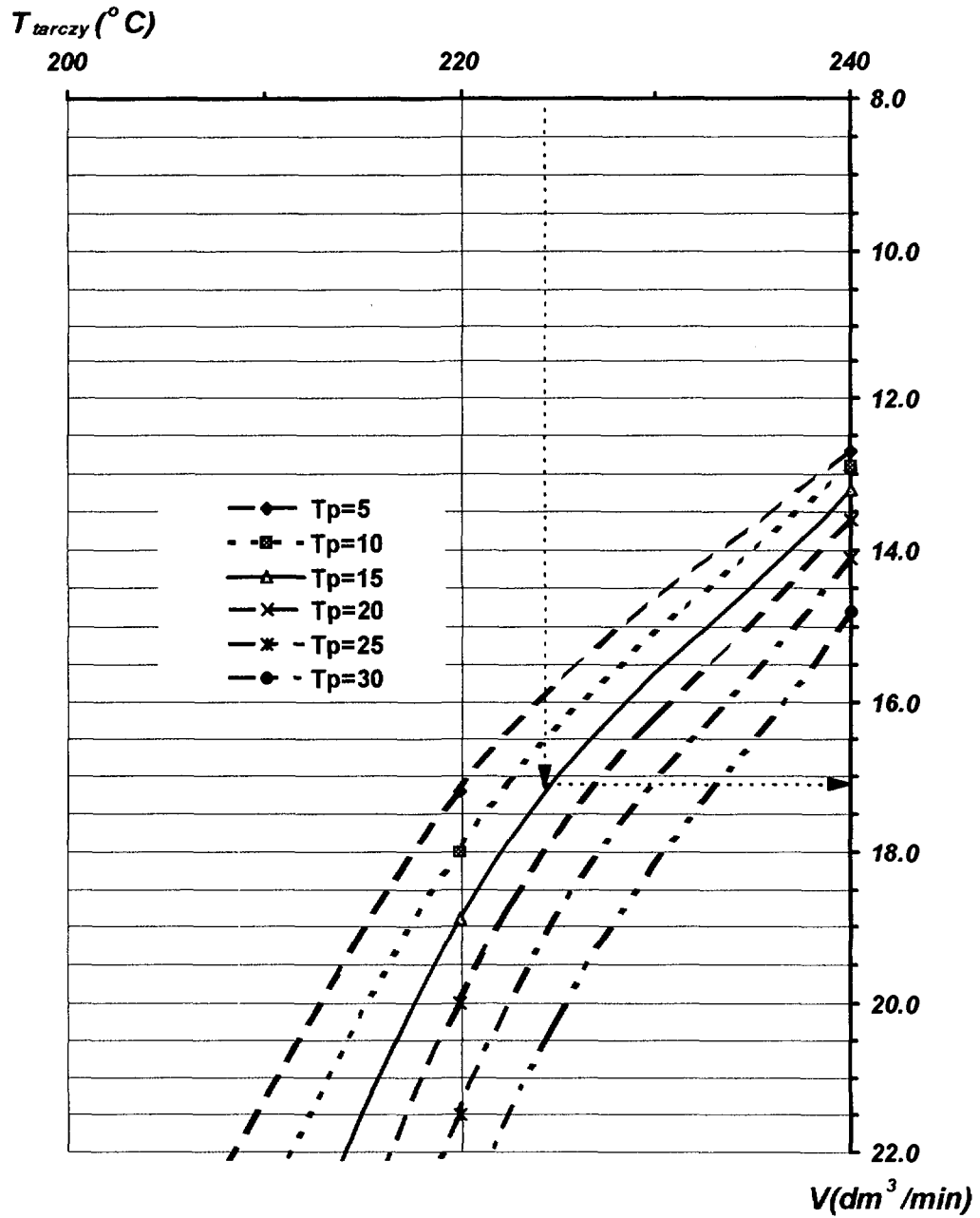
Wnioski i wskazówki konstrukcyjne:

Z przedstawionych rozważań wynika, że konstrukcję wewnętrzną głowicy można wykonać w oparciu o proponowaną budowę, wykonując podkładkę z blachy miedzianej o grubości 3 mm i żebra jak na przedstawionym rysunku.

Przedstawione powyżej obliczenia optymalizacyjne wskazują, że efektywność chłodzenia stosunkowo słabo zależy od temperatury początkowej wody. Przy zastosowaniu przepływu wody rzędu $10 \text{ dm}^3/\text{min}$ dla tarcz kadmowej i cynkowej oraz $14 \text{ dm}^3/\text{min}$ dla tarczy bizmutowej, temperatura tarczy nie powinna w czasie naświetlania przekroczyć wymaganych odpowiednio 155 i 240 [°C]. W przypadku konieczności uzyskania bardziej radykalnego schłodzenia tarczy należy odpowiednio zwiększyć przepływ wody, do wartości pokazanych na poniższych nomogramach:



Nomogram do wyznaczania $T_{tarczy}(Bi)=f(V)$



Podziękowania

Praca została wykonana jako przygotowanie do inwestycji aparaturowej, finansowanej przez KBN (nr decyzji 1975/IA/620/96).

Autorzy składają podziękowania Panom: dr inż. B.N.Gikałowi z ZIBJ w Dubnej (B.P.) oraz dr inż. A.Durychowi z Politechniki Krakowskiej (M.Sz.) za cenne uwagi i dyskusje.

Literatura:

- ¹ B. Petelenz - Założenia użytkowe do projektu stanowiska do aktywacji tarcz w stanie stałym na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144 - *Raport IFJ* Nr 1740/C, Kraków, 1996.
- ² M.Sajjad, R.M.Lambrech - Cyclotron Targetry for Medical Radioisotope Production - *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **B40** (1989) 1100-1104.
- ³ I.V.Kolesov - Konstruktsiya Probnikov dla Sinteza Transuranovykh Elementov na Vnutrennem Puchke Ionov 310-Santimetrovogo Tsiklotrona - *Raport ZIBJ* no. 13-3667, Dubna 1968.
- ⁴ Radioisotope Production and Quality Control - *Technical Report Series*, no. 128, IAEA, Vienna, 1971.
- ⁵ J.R.Dahl, R.S.Tilbury - The Use of a Compact, Multi-Particle Cyclotron for the Production of ⁵²Fe, ⁶⁷Ga, ¹¹¹In and ¹²³I for Medical Purposes - *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* **23** (1972) 431-437.
- ⁶ J.Lorkiewicz, J.Olszewski, E.Pławski, J.Sura, J.Wojtkowska - The C-30 Compact Cyclotron at Świerk as a Potential Source for Production of Short Life-Time Isotopes - *Nukleonika* **41** (1996) 67-74.
- ⁷ R.H.Larsen, B.W.Wieland, M.R.Zalutsky - Evaluation of an Internal Cyclotron Target for the Production of ²¹¹At via the ²⁰⁹Bi(α , 2n)²¹¹At reaction - *Applied Radiation and Isotopes* **47** (1996) 135-143.
- ⁸ B.N.Gikal (ZIBJ, Dubna) - informacja prywatna, 1997.
- ⁹ J.Kotey Amartey, E.D.Carrol (King Faisal Specialist Hospital, Saudi Arabia) - informacja prywatna, 1997.
- ¹⁰ G.Pinto, M.Straatman, D.Schlyer, J.Currin, G.Hendry - Target Systems for Radioisotope Production - *IEEE Transactions on Nuclear Science* **NS30** (1983) 1797-1800.
- ¹¹ T. Hobler - *Ruch ciepła i wymienniki* - WNT, Warszawa 1986.
- ¹² *CRC Handbook of Physics and Chemistry*, 64th Edition, 1983-1984.