

Edmund PIĘTKA

Politechnika Śląska  
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

## STRUMIEŃ CIEPŁA W KANAŁE KABLA PRĄDOWEGO KRIOOPOROWEGO

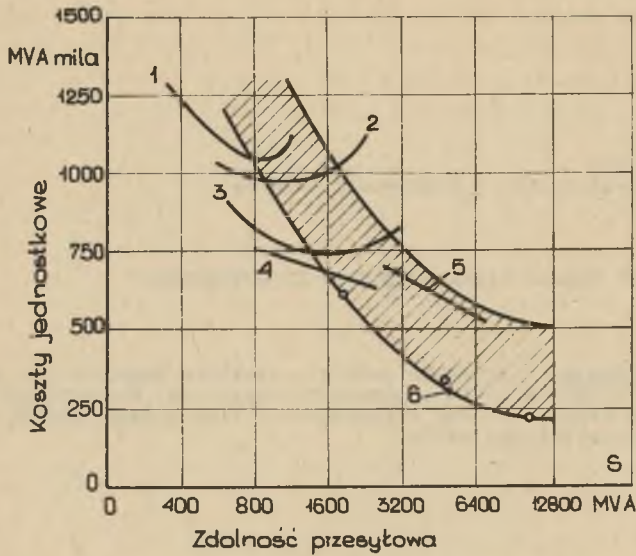
**Streszczenie.** W artykule omówiono niektóre zagadnienia związane z wymianą ciepła w kablu prądowym krioporowym. Rozpatrzono zjawisko kryzysu wrzenia cieczy kriogenicznej oraz podano sposób określenia masy wyparowanego azotu.

### 1. Wstęp

Kable prądowe krioporowe i nadprzewodzące stanowią interesujące rozwiązanie - ze względów technicznych i ekonomicznych - problemu przesyłu dużych mocy (rys. 1). W pierwszych publikacjach dotyczących tego zagadnienia zajmowano się jedynie możliwościami budowy i stosowania kabli nadprzewodzących [2]. Obecnie jednak zdaniem niektórych autorów [3,4] kable krioporowe są najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem techniczno-ekonomicznym (rys. 2). Wykorzystanie kabli prądowych krioporowych w warunkach krajowych wydaje się być uzasadnione, zwłaszcza w energochłonnych zakładach chemicznych, dysponujących w dostatecznych ilościach niehandlowymi cieczami kriogenicznymi. Wymaga to jednak szeregu badań szczególnie w zakresie technologii budowy optymalnych konstrukcji, przewodów prądowych krioporowych.

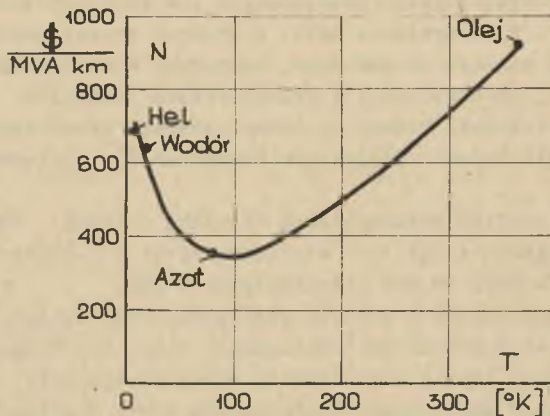
Interesujący projekt wykorzystania techniki niskich temperatur przy konstrukcji skompensowanego toru wielkoprądowego w 6-elektrodowym piecu łukowo-oporowym o mocy 48 MVA przedstawiono w [5].

W torze wielkoprądowym w postaci współśrodkowych cylindrów płynie prąd o natężeniu 120 kA w przeciwnych kierunkach (rys. 3). Osiąga się w ten sposób symetryzację toru i zredukowanie zewnętrznego pola magnetycznego, a tym samym znaczne zmniejszenie dodatkowych strat cieplnych w osłonach termicznych. O obciążalności przewodów prądowych krioporowych i sprawności przesyłu energii decydują między innymi warunki odprowadzania strat cieplnych. Pogorszenie warunków wymiany ciepła powoduje zwiększenie różnicy temperatury pomiędzy przewodem prądowym a kriocieczą i wzrost rezystancji przewodu oraz obniżenie sprawności przesyłu. Jest to poważne zagadnienie w przypadku kabli prądowych krioporowych, w których wymiana



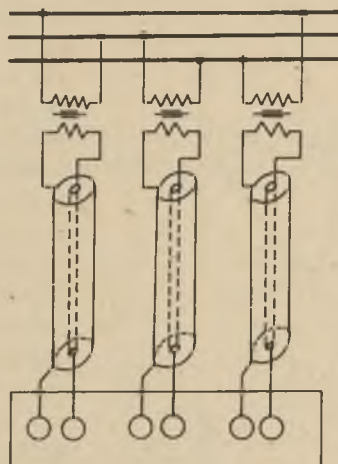
Rys. 1. Koszty jednostkowe różnych systemów podziemnego przesyłu energii elektrycznej [1]

1 - kable konwencjonalne napięcia przemiennego; 2 - kable konwencjonalne napięcia przemiennego z wymuszonym chłodzeniem; 3 - kable konwencjonalne napięcia stałego; 4 - kable krioporowe; 5 - kable o izolacji gazowej pod ciśnieniem; 6 - kable nadprzewodzące



Rys. 2. Zależność nakładów inwestycyjnych  $N$  od temperatury roboczej żył kabla -  $^{\circ}K$  [3]

ciepła realizowana jest przez odparowanie cieczy oziębiającej. Przekroczenie dopuszczalnego obciążenia spowodować może tzw. kryzys wrzenia krio-cieczy.



Rys. 3. Układ 6-elektrodowego pieca z siecią wielkopiędową, wykonaną z nadprzewodników względnie chemicznie czystych metali oziębionych do temperatur kriogenicznych [5]

## 2. Kryzys wrzenia

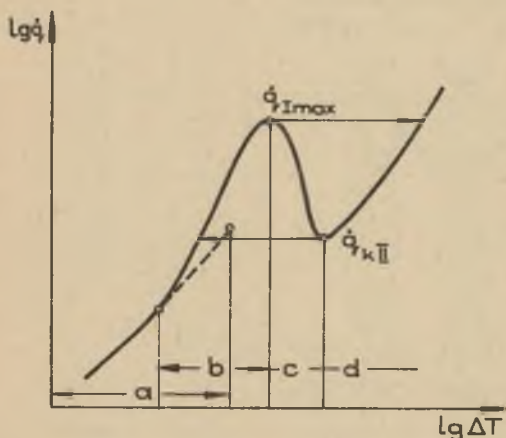
Natężenie przepływu ciepła przy wrzeniu cieczy określają strumień cieplny  $q$  i przyrost temperatury ściany przewodu  $\psi_w$  ponad temperaturę nasycenia  $T_s$  cieczy ( $\Delta T = \psi_w - T_s$ ) wg zależności:

$$\dot{q} = q(\Delta T), \quad (1)$$

przy czym  $\dot{q}$  - w  $W/m^2$  odniesiony jest do czasu i powierzchni, na której następuje wrzenie.

Proces wrzenia cieczy w kablach prądowych kriooporowych, gdzie wymiana ciepła odbywa się przez odparowanie azotu, może mieć charakter wrzenia w dużej objętości. Oznacza to, że powstające pęcherze gazu odprowadzane są intensywnie, nie gromadząc się w osłonie termicznej kabla prądowego kriooporowego, a pęcherzyki gazu przechodzą swobodnie przez ciecz pod wpływem działającego sił grawitacji. Proces przepływu ciepła przy wrzeniu nasyconym składa się z kilku kolejnych i zróżnicowanych etapów wrzenia. Na rysunku 4 pokazano zależność (1), zaznaczając wszystkie etapy wrzenia.

W przypadku wrzenia azotu zależności strumienia ciepła od temperatury przegrzania podano na rys. 5. Przy nieznacznym przegrzaniu cieczy oraz małym strumieniu cieplnym przepływ ciepła zachodzi na skutek konwekcji naturalnej (rys. 4 przedział a).



Rys. 4. Krzywa wrzenia cieczy z zaznaczonymi etapami [6, 7]:

a - etap konwekcji naturalnej; b - wrzenie pęcherzykowe; c - wrzenie przejściowe; d - wrzenie błonowe

ciała, której miarą jest współczynnik wnikania ciepła, ustalony w oparciu o równanie Pecleta:

$$\alpha_1 = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad (2)$$

Duże wartości  $\alpha_1$  wynikają z dużej intensywności mieszania cieczy przedzierającymi się przez nią pęcherzykami pary. Powstająca błona parowa powoduje gwałtowne zmniejszenie współczynnika (2) i taki etap wrzenia nazywa się wrzeniem błonowym. Gwałtowne przejście z etapu wrzenia pęcherzykowego przy  $\dot{q}_{Imax}$  do wrzenia błonowego zwane jest pierwszym kryzysem wrzenia. Przejście odwrotne odbywa się także nagle w wyniku rozpadu błony na oddzielne pęcherze. Zachodzi ono jednak przy innej wartości strumienia ciepła  $\dot{q}_{kII}$  i nazywane jest drugim kryzysem wrzenia. Zjawisko pierwszego kryzysu wrzenia, jakie może nastąpić w czasie awarii kabla prądowego krioprowadowego, wymaga szczególnego omówienia.

Z rysunków 4 i 5, wynika, że po przekroczeniu wartości  $\dot{q}_{Imax}$  następuje skokowy i niebezpieczny wzrost temperatury ściany przewodu. Zaburzenia

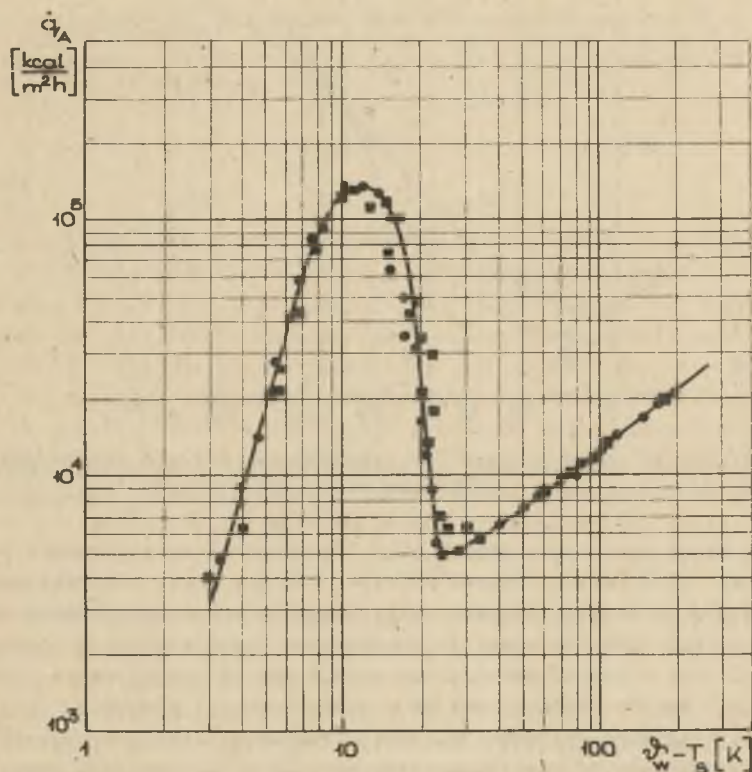
W miarę zwiększania strumienia cieplnego pojawiają się pierwsze pęcherzyki pary na powierzchni ściany grzewczej. Liczba i częstość ich pojawiania się wzrasta w wyniku zwiększania strumienia wnikającego do cieczy. Jest to tzw. wrzenie pęcherzykowe (rys. 4 przedział b). Gdy liczba pęcherzyków jest dostatecznie duża, to zaczynają one łączyć się z sobą, zanim zdążą się oderwać od ściany. Powstaje w ten sposób błona parowa, obejmująca ze wzrostem strumienia ciepła całą powierzchnię grzewczą. Pogarsza ona znacznie intensywność odprowadzania ciepła,

w procesie wymiany ciepła powodują również wzrost rezystywności przewodu, która w temperaturze  $T$ , zgodnie z równaniem Grüneisena-Blocha [9], wynosi:

$$\rho = \frac{T^5}{\theta^6} \int_0^{\theta/T} \frac{x^5 dx}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} \quad \text{dla} \quad \theta > T > 0,5\theta, \quad (3)$$

przy czym:

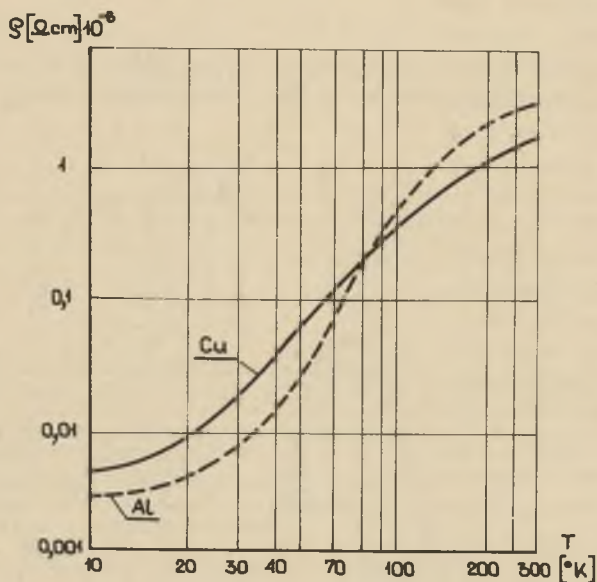
$\theta$  - temperatura Debye'a przyjmowana jest w dokładnych obliczeniach jako temperatura charakterystyczna, właściwa dla danego metalu [10].



Rys. 5. Krzywa wrzenia dla ciekłego azotu [8] - wrzenie pęcherzykowe, wrzenie w warunkach przejściowych, wrzenie błonowe na kulkach o średnicach 12,7 mm (punkty ■) i 25,4 (punkty ●) (1 kcal/h-1,164 W)

Wzrost rezystancji kabla prądowego krioporowego powoduje zwiększenie strumienia ciepła w przewodzie oraz przyrost jego temperatury. Zależność rezystancji chemicznie czystego aluminium od temperatury (rys. 6) pozwala na ocenę wartości przyrostu strat Joule'a i gęstości strumienia ciepła.

Charakterystyka przedstawiona na rys. 5 pozwala natomiast ocenić przyrost temperatury ściany grzejnej wywołany pierwszym kryzysem wrzenia. Na pierwszy kryzys wrzenia wpływa duża liczba czynników, a w szczególności kształt i położenie powierzchni grzejnej oraz wielkość i stosunek rozmiarów powierzchni wnikań ciepła do rozmiarów przestrzeni kanału zajmowanej przez wrzącą ciecz.



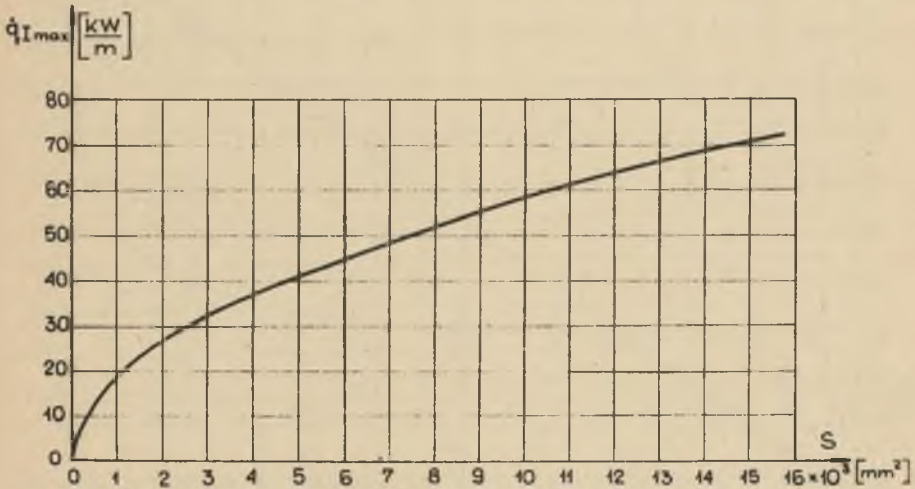
Rys. 6. Zależność rezystywności od temperatury dla chemicznie czystego aluminium [11]

Wyniki badań eksperymentalnych [12, 13] wykazały również wpływ pola elektrycznego na zjawisko kryzysu wrzenia. Pomiarzy mające na celu ustalenie krzywej wrzenia dla ciekłego azotu (rys. 5) wykonane zostały w USA na zlecenie NASA [8]. Wykonano je w warunkach wrzenia azotu na powierzchniach kulistych o rozmiarach 12,7 mm i 25,4 mm i w tym zakresie średnic nie wykazały wpływu wymiarów kul na przebieg krzywej wrzenia. Pozwoliły one również określić krytyczną wartość strumienia ciepła,  $\dot{q}_{I\max} = 16,3 \cdot 10^4$  W/m<sup>2</sup>, przydatną dla potrzeb konstrukcyjnych. Przykładowo, dla pręta o przekroju kołowym równym 100 mm<sup>2</sup>, krytyczny strumień ciepła na jednostkę długości wynosi:

$$\dot{q}_{\max} = 2\pi \cdot \dot{q}_{I\max} = 5,774 \text{ kW/m dla } \Delta T = 12 \dots 13 \text{ K.} \quad (4)$$

Dla temperatury wrzenia azotu  $T = 77,35^\circ\text{K}$ , przy ciśnieniu 98066,5 N/m<sup>2</sup>, temperatura azotu na ścianie grzejnej, gdzie występuje  $\dot{q}_{I\max}$ , jest o  $\Delta T =$

= 12 ... 13 K wyższa. Zwiększenie strumienia ciepła ponad wartość  $\dot{q}_{I_{max}}$  spowoduje wrzenie błonowe, któremu odpowiada nagłe przejście z punktu krytycznego  $\dot{q}_{I_{max}}$  na punkt leżący na odcinku odpowiadającym wrzeniu błonowemu (rys. 4). Ze względu na duże trudności pomiarowe dla wysokich temperatur ( $< 500^{\circ}\text{K}$ ) i gęstości strumienia ciepła ustalenie dokładnej wartości  $\Delta T$  nie wydaje się możliwe. Wartość  $\Delta T$  można w przybliżeniu ocenić z eksploatacji krzywej na rys. 5.



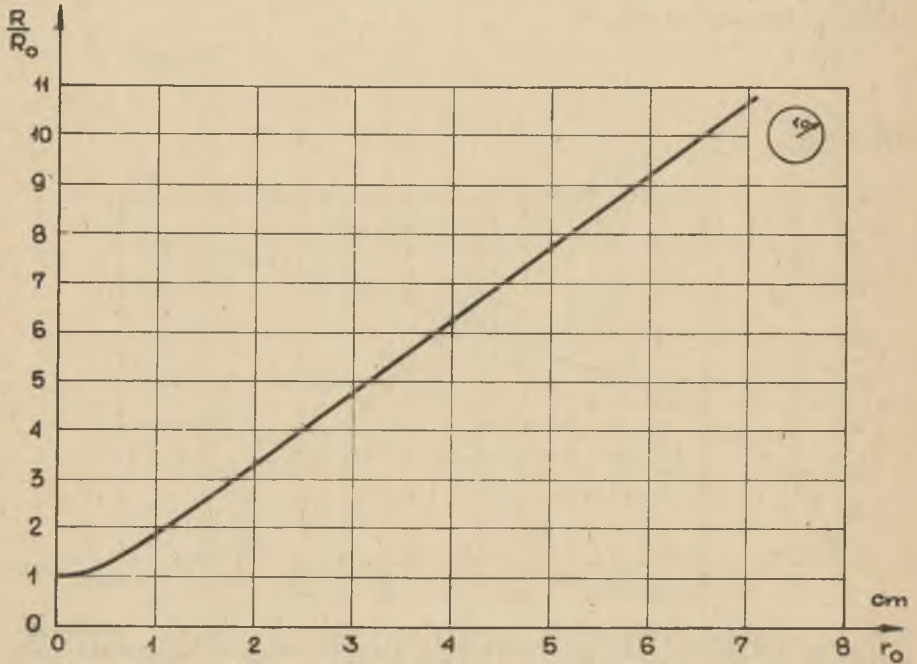
Rys. 7. Zależność krytycznych gęstości strumienia ciepła dla przewodów o przekroju kołowym zanurzonych w ciekłym azocie ( $77^{\circ}\text{K}$ ) od wielkości powierzchni przekroju. (Obliczenia wykonano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych [8])

Podczas wrzenia na powierzchni ściany występuje efekt łączenia się pęcherzy w jedną gazową warstwę izolującą, co powoduje znaczny wzrost temperatury ściany przewodów. Do powierzchni ściany z przestrzeni ciekłej przedostają się sporadycznie i punktowo pojedyncze krople azotu, które momentalnie odparowują i podtrzymując izolującą warstwę azotu gazowego odpychają ciecz. Jest to niekorzystne, ponieważ wzrost temperatury powoduje wzrost rezystywności, a więc również zwiększone wydzielanie się ciepła, proporcjonalnie do kwadratu natężenia prądu. Krytyczne gęstości strumienia ciepła  $\dot{q}_{I_{max}}$  na powierzchni przewodów o przekroju kołowym podano na rys. 7. W stanie ustalonym krytycznej gęstości strumienia ciepła odpowiada, zgodnie z prawem Joule'a, krytyczna wartość prądu  $I_k$  określona wzorem:

$$I_k = \sqrt{\frac{P \cdot \dot{q}_{I_{max}}}{R}} \quad (5)$$

przy czym:

- F - powierzchnia grzejna odniesiona do jednostki długości przewodu,  
 $\dot{q}_{\text{Imax}}$  - krytyczna gęstość strumienia ciepła,  
 R - rezystancja.

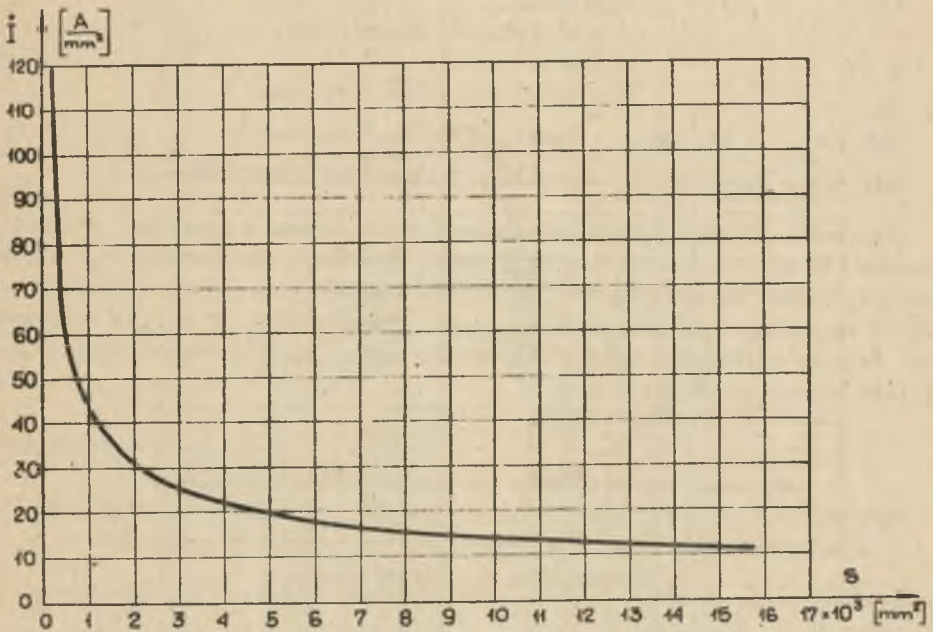


Rys. 8. Charakterystyka rezystancji aluminiowego przewodu o przekroju kołowym w funkcji promienia dla prądu sinusoidalnie zmiennego 50 Hz w odniesieniu do rezystancji prądu stałego. Temperatura przewodu 77°K. Rezystywność  $\varrho_{\text{AL5N}^{\circ}\text{K}} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$

$$\varrho_{\text{AL5N}^{\circ}\text{K}} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$$

Ustalenie wartości prądu  $I_k$  wymaga uwzględnienia przyrostu temperatury przewodu (rys. 5) oraz zmiany jego rezystywności (3). Dla prądu sinusoidalnego określenie krytycznej wartości  $I_k$  wymaga dodatkowo uwzględnienia nierównomiernego rozkładu jego gęstości w przekroju poprzecznym przewodu. Zjawisko to powoduje wzrost rezystancji przewodu zależne od jego promienia, temperatury i stopnia czystości metalu (rys. 8).





Rys. 9. Zależność krytycznych gęstości prądu sinusoidalnie zmiennego 50Hz od powierzchni przekroju, dla krioprzewodów wykonanych z aluminiowych prętów ( $\rho_{AL5N577^{\circ}K} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) o przekroju kołowym, zanurzonych w ciekłym azocie ( $77^{\circ}K$ ). (Obliczenia wykonano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych [8])

Zależność rezystancji  $-R^x$ , przewodu o przekroju kołowym dla prądu sinusoidalnie zmiennego w odniesieniu do rezystancji prądu stałego  $R_0$ , ujmuje równanie:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\alpha r_0}{2} \frac{\sqrt{[\text{ber}(\alpha r_0)]^2 + [\text{bei}(\alpha r_0)]^2}}{\sqrt{[\text{ber}'(\alpha r_0)]^2 + \text{bei}'(\alpha r_0)^2}} \cdot \sin[\varphi'(\alpha r_0) - \varphi(\alpha r_0)] \quad (4)$$

przy czym:

$$\alpha = \sqrt{\omega \mu \gamma}; \quad \varphi'(\alpha r_0) = \text{arctg} \frac{\text{bei}'(\alpha r_0)}{\text{ber}'(\alpha r_0)}; \quad \varphi(\alpha r_0) = \text{arctg} \frac{\text{bei}(\alpha r_0)}{\text{ber}(\alpha r_0)},$$

<sup>x)</sup> Określa się w oparciu o twierdzenie Pyontinga.

gdzie:

- $\omega$  - pulsacja,  
 $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  
 $\tau$  - konduktywność,  
 $r_0$  - promień przekroju przewodu,  
ber ( $\alpha r_0$ ) i bei ( $\alpha r_0$ ) - funkcje Kelvina-Thomsona,  
ber' ( $\alpha r_0$ ) i bei' ( $\alpha r_0$ ) - pochodne funkcji Kelvina-Thomsona.

Zależność krytycznych gęstości prądu przemiennego o przebiegu sinusoidalnym (50 Hz) od przekroju aluminiowych przewodów, zanurzonych w ciekłym azocie, podano na rys. 9. W obliczeniach uwzględniono przyrost temperatury na powierzchni przewodu, zmianę jego rezystywności i przyrost rezystancji wskutek nierównomiernego rozkładu gęstości prądu. Niektóre wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

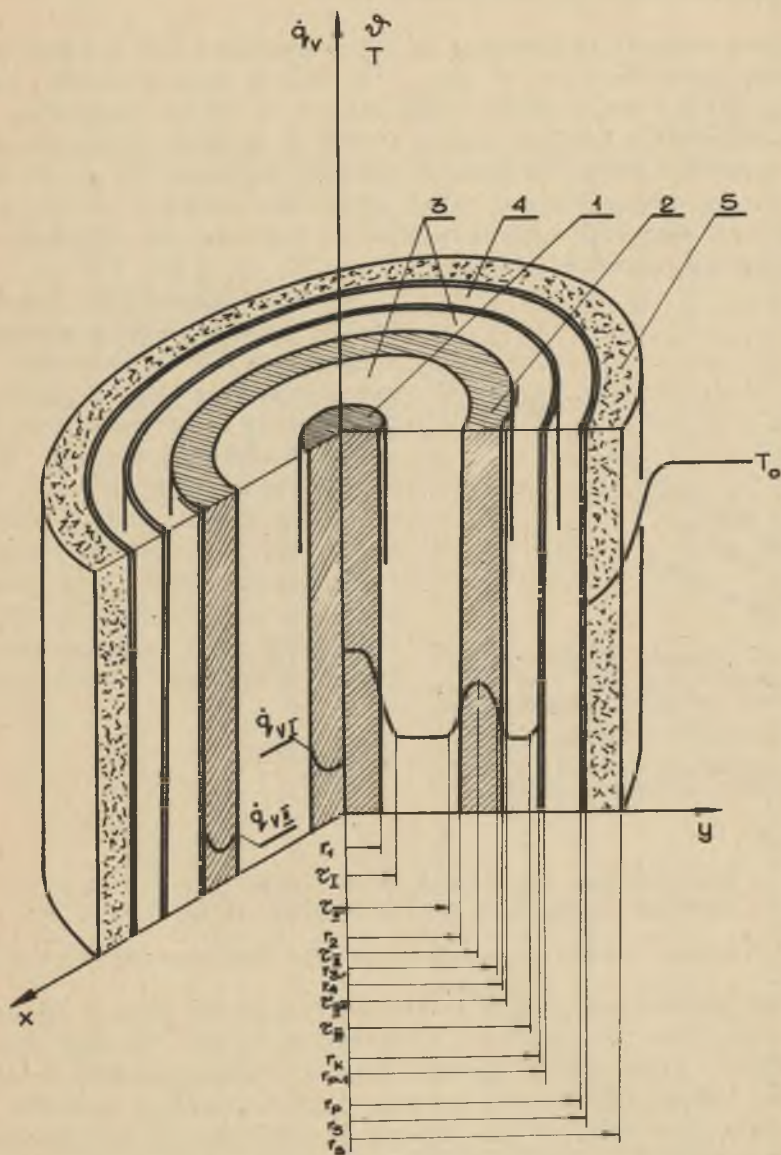
Tablica 1

Wartości współczynnika efektu naskórkowego ( $R/R_0$ ), krytycznych gęstości strumienia ciepła ( $q_{I\max}$ ) i gęstości prądu ( $I$ ) w zależności od promienia przekroju ( $r_0$ ) przewodów aluminiowych zanurzonych w ciekłym azocie

Lp.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
S	mm <sup>2</sup>	17,5	437,4	1749	3936	7028	10972	13767	14784	15792
$r_0$	mm	2,36	11,8	23,6	35,4	47,3	59,1	66,2	68,6	70,9
$\frac{R}{R_0}$	-	1,005	2,043	3,799	5,562	7,328	9,094	10,154	10,508	10,861
$q_{I\max}$	$\frac{kW}{m}$	2,4	12,08	24,11	36,17	48,39	60,50	67,77	70,23	72,58
I	$\frac{A}{mm^2}$	215	67,11	34,87	23,45	17,69	14,22	12,68	12,24	11,87

Z przedstawionych w tabl. 1 wartości wynika, że kryzys wrzenia azotu może nastąpić w przypadku dużego przekroju przewodu, przy stosunkowo niskich gęstościach prądu. Nawet nieznaczne przekroczenie krytycznego natężenia prądu powoduje wrzenie błonowe, tzn. stan, w którym ilość wydzielonego ciepła jest tak duża, że grozi to gwałtownym odparowaniem azotu.

Dla przewodów o innych profilach przekroju ustalenie parametrów określających stan krytyczny wymaga kosztownych badań eksperymentalnych. Innym ważnym zagadnieniem jest sposób odprowadzania ciepła Joule'a z powierzchni nagrzaných, realizowany w przypadku skompensowanego kabla prądowego krioproporowego (rys. 10) przez odparowanie kriocieczy (azotu).

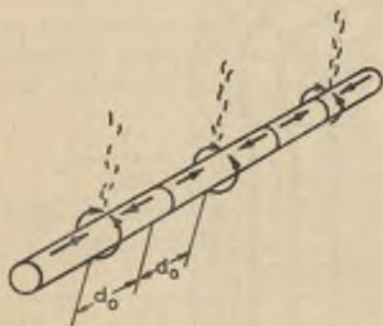


Rys. 10. Poglądowy rozkład strumieni ciepłych i temperatur w zależności od promienia w kanale przewodu krioporowego:

1 - przewód główny, 2 - przewód kompensacyjny, 3 - ciekły azot, 4 - próżnia, 5 - izolacja perlitowo-azotowa

### 3. Wymiana ciepła przez odparowanie azotu

Proces odparowania następuje na powierzchniach styku ciekłego azotu ze ścianami przewodów (rys. 10, poz. 1, 2) oraz na ścianie kanału o promieniu  $r_k$ , przez którą strumień ciepła wnika z otoczenia. Wytworzoną parę można odprowadzać lokalnie poprzez otwory na ścianach kanału lub na końcach przewodu w przypadku krótkich odcinków zasilania (15 ... 30 m). Para wydziela się równomiernie na całej powierzchni przewodu, ale jej przepływ przez ciecz następuje w kierunku pionowym w postaci tzw. warkoczy w odległościach pokazanych na rys. 11.



Rys. 11. Kierunki główne ruchu pary azotu wytwarzanej na powierzchni przewodu okrągłego [15]

$d_0$  - odległość, w której występują największe różnice temperatury na ścianie pręta

W przypadku lokalnego odbioru pary wrzenie azotu zachodzi w warunkach nieskrępowanych w dużej objętości. Odprowadzenie pary na końcach kanału powoduje wrzenie w tzw. warunkach skrępowanych. O warunkach wrzenia decyduje przepływ wytworzonej pary, a tylko w niewielkim stopniu ruch konwekcyjny cieczy, czy też nawet jej nieznaczny ruch wymuszony. Masa azotu, jaka w jednostce czasu w postaci gazowej powstaje w kanale kabla prądowego kriooporowego, określona jest zależnością:

$$\dot{m} = \frac{\lambda \cdot \dot{q}_{A1}}{r_t} \quad (7)$$

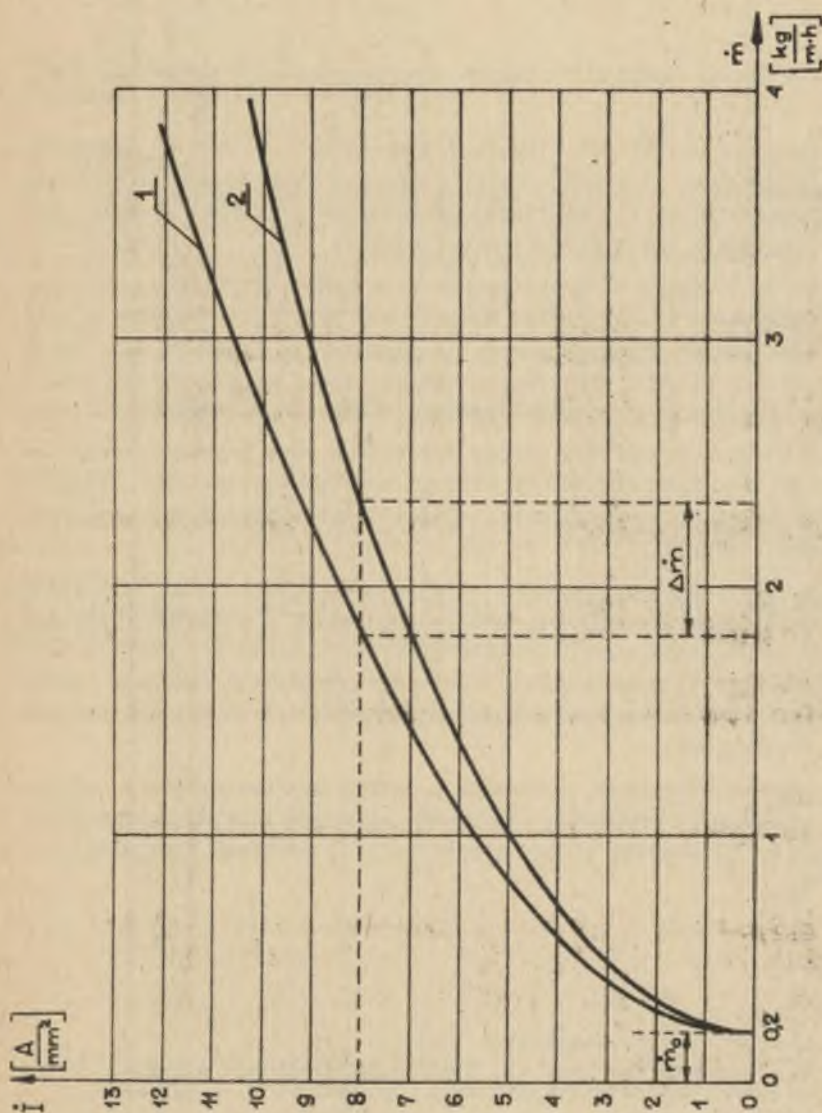
w której:

$\lambda$  - powierzchnia, przez którą wnika ciepło,

$\dot{q}_{A1}$  - strumień ciepła wnikający do ciekłego azotu,

$r_t$  - utajone ciepło parowania azotu przy ciśnieniu 98066,5 N/m<sup>2</sup>.

Ilość wyparowanego azotu w zależności od gęstości prądu w aluminiowych przewodach (rys. 10, poz. 1, 2) przedstawiono na rys. 12. Masa wyparowanego azotu w zależności od gęstości prądu i stopnia czystości metalu stanowi dla kabla prądowego kriooporowego jeden z istotnych elementów decydujących o sprawności przesyłu energii elektrycznej. Innym ważnym czynnikiem jest wartość strumienia ciepła wnikającego z otoczenia do ciekłego azotu. Dla przedstawionego na rys. 10 modelu jego gęstość na wewnętrznej ścianie kanału przy temperaturze otoczenia 295<sup>o</sup>K wynosi zaledwie 10,4W/m<sup>2</sup>. Uzyskuje się to poprzez stosowanie dwóch osłon termicznych - próżniowej i perlitowo-azotowej. Zaletą tej konstrukcji jest możliwość eksploatacji kabla kriooporowego nawet w przypadku awarii instalacji próżniowej. Rozwią-



Rys. 12. Zależność masy wyparowanego azotu od gęstości prądu sinusoidalnie zmiennego 50 Hz w aluminiowych przewodach kabla krioporowego (rys. 10)  
 Przewody aluminiowe o czystości: 1-5N5  $\Delta$ ,  $\rho_{77} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ , 2-2N75  $\Delta$   $\rho_{77} = 0,295 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ .  $\dot{m}_0$  - masa azotu wyparowana w wyniku niedoskonałości izolacji termicznej kablokable.  $\Delta \dot{m}$  - przyrost masy wyparowanej w zależności od stopnia czystości aluminium

zanie takie zapewnia dużą niezawodność zasilania i w wielu przypadkach umożliwia usuwanie awarii w czasie eksploatacji kablokabl.

#### 4. Wnioski

W oparciu o przeprowadzone w różnych ośrodkach badania można założyć, że:

- a) przy transporcie energii elektrycznej w wysokości około 1 GW ekonomicznie uzasadnione jest stosowanie kabli prądowych krioporowych. Wykazują one przy podanej mocy niższe koszty jednostkowe przesyłu energii niż kable tradycyjne i nawet kable nadprzewodzące;
- b) wykorzystanie techniki niskich temperatur w konstrukcji skompensowanego kabla prądowego krioporowego stanowi korzystne pod względem ekonomicznym rozwiązanie przesyłu energii elektrycznej. Zapewnia ono symetryzację toru i poważne zredukowanie zewnętrznego pola magnetycznego a tym samym likwidację strat magnetycznych w osłonie termicznej;
- c) pogorszenie warunków wymiany ciepła spowodować może kryzys wrzenia azotu. Zjawisko to zachodzi przy określonej granicznej gęstości strumienia ciepła na powierzchni przewodu - niezależnie od stopnia intensywności wymiany ciepła.
- d) przekroczenie granicznej gęstości strumienia ciepła na powierzchni przewodu spowoduje wrzenie błonowe azotu, tzn. stan, w którym nastąpi gwałtowne odparowanie azotu, co może być równoznaczna z eksplozją osłony termicznej kabla prądowego krioporowego. Maksymalną gęstość prądu w przewodzie określa wartość dopuszczalnej gęstości strumienia ciepła na jego powierzchni,
- e) pręty o przekroju kołowym, zwłaszcza o dużych promieniach, nie wydają się być odpowiednim przewodem dla prądów sinusoidalnie zmiennych (50Hz) ze względu na intensywny wzrost strat Joule'a, wywołany zjawiskiem nasórkowym.

#### LITERATURA

- [1] Energy and the Future, Washington 1973.
- [2] Nagano M., Fukusawa M., Kume A.: Field test of liquid nitrogen cooled cryogenic power cable. Cryogenic Vol. 13, 1973 No 4, p. 291-323.
- [3] Graneau P.: Economics of underground transmission with cryogenic cables. IEEE Trans. Power App. and Syst. 1970 s. 1.
- [4] Afshartous S., Graneau P.: Econom assesment of a liquid-nitrogen-cooled cabla. Trans. IEEE Power App. and Syst. 1970 s. 8.

- [5] Smezjanskij M.J., Okołotin U.S.: Primiwienie kriogenного ochładzania obmotok pasnych transformatorow i wtornych tokopodrodow, Elektrotermija, wyp. 71, 1968.
- [6] Staniszewski B. Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa 1963.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В КАНАЛЕ  
ТОКОВЕДУЩЕГО КРИОГЕННОГО КАБЕЛЯ

Р е з ю м е

В статье обсуждаются некоторые вопросы связанные с теплообменом в токоведущем криогенном кабеле. Рассматривается явление кризиса кипения криогенной жидкости и приводится способ определения массы испарившегося азота.

HEAT FLUX IN THE CRYO-RESISTANT CABLE CHANNEL

S u m m a r y

Some problems connected with heat transfer in cryoresistant cables are discussed, with attention drawn to the boiling crisis phenomenon of the cryogenic fluid.

A method of estimating the flow values of the heat penetrating the thermic shield of the cryo-duct is also given.