

MACIEJ ZARZYCKI, EUGENIUSZ KANIA

Katedra Maszyn Hydraulicznych i Powietrznych

POMPY ELEKTROMAGNETYCZNE DO TRANSPORTU METALI
W STANIE CIEKŁYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono dotychczasowe zasadnicze rozwiązania pomp elektromagnetycznych do transportu ciekłych metali. Podano również podział tych pomp, uwzględniając zasadę działania, rodzaj zastosowanego prądu elektrycznego oraz konstrukcję kanału, którym przepływa transportowany czynnik. Ponadto w publikacji zwrócono uwagę na prace doświadczalno-konstrukcyjne prowadzone w Katedrze Maszyn Hydraulicznych i Powietrznych z zakresu pomp elektromagnetycznych.

1. Wstęp

Rozwój techniki jądrowej zaznaczający się zwłaszcza w ostatnich latach spowodował intensyfikację prac nad nowymi rozwiązaniami maszyn magnetohydrodynamicznych znajdujących zastosowanie w instalacjach termojądrowych. Do urządzeń tych należą między innymi pompy elektromagnetyczne. Urządzenia te zalicza się do pomp specjalnych [1] [2]. Pompy elektromagnetyczne nie posiadają części ruchomych, a ruch ośrodka jest wywołany wpływem sił pola magnetycznego [3]. W przypadku, gdy w polu magnetycznym znajduje się ciekły metal, przez który przepływa prąd elektryczny, to na cząstki tego metalu działają siły elektromagnetyczne, powodując jego przepływ [4]. Ruch uzyskujemy również gdy ciekły metal znajdzie się w polu magnetycznym wytworzonym przez trójfazowe uzwojenie zasilane prądem przemiennym [5].

Biorąc pod uwagę dotychczas opracowane konstrukcje pomp elektromagnetycznych można je ze względu na zasadę działania podzielić na:

- 1) kondukcyjne,
- 2) indukcyjne.

Natomiast ze względu na rodzaj zastosowanego prądu elektrycznego na:

- pompy prądu stałego (z polem magnetycznym wytworzonym przez magnes stały bądź elektromagnes),
- pompy prądu przemiennego.

Pompy elektromagnetyczne kondukcyjne ze względu na konstrukcję kanału dzieli się na:

- pompy z kanałem liniowym,
- pompy z kanałem pętlicowym.

Natomiast pompy elektromagnetyczne indukcyjne ze względu na konstrukcję kanału, którym przepływa transportowany czynnik dzieli się na:

- pompy z kanałem liniowym,
- pompy z kanałem cylindrycznym,
- pompy z kanałem spiralnym.

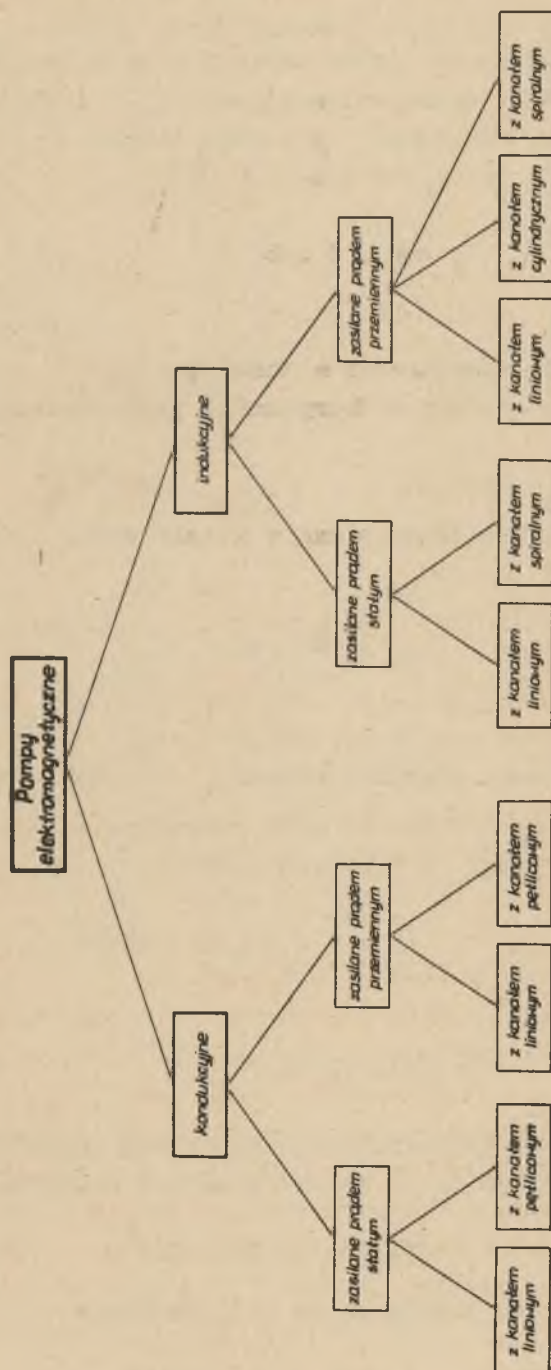
Podział klasyfikacyjny pomp elektromagnetycznych przedstawiono na rysunku 1.

Pompy elektromagnetyczne ze względu na brak części ruchomych, prostą budowę oraz łatwą obsługę mogą być stosowane w metalurgii do transportu metali w stanie ciekłym, w instalacjach chemicznych do przetłaczania cieczy o dobrej przewodności elektrycznej oraz ostatnio również i w medycynie do przetłaczania krwi.

2. Elektromagnetyczne pompy kondukcyjne

Elektromagnetyczne pompy kondukcyjne pracują na zasadzie oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik przez który płynie prąd elektryczny, umieszczony w tym polu [6].

W pompach tej podgrupy rolę przewodnika spełnia czynnik transportowany kanałem znajdującym się w polu magnetycznym. W dwu przeciwległych ściankach kanału znajdują się elektrody do których przyłożone jest napięcie elektryczne. Pomiędzy elektrodami następuje przepływ prądu.



Rys. 1. Podział pomp elektromagnetycznych

Przy założeniu idealnych warunków pracy pompy - przy przepływie prądu tylko przez ciekły ośrodek i przy jednorodnym polu magnetycznym siła elektromagnetyczna F_k działająca na ośrodek o objętości określonej wymiarami kanału (rys. 2) wynosi (zastosowano jednostki w układzie SI [7]):

$$F_k = B \cdot I \cdot b \cdot N \quad (1)$$

gdzie:

B T - indukcja magnetyczna w kanale,

I A - natężenie prądu elektrycznego płynącego przez ośrodek,

b m - szerokość kanału,

stąd ciśnienie elektromagnetyczne w kanale pompy określa wyrażenie:

$$p_e = \frac{F_k}{S} \quad \text{N/m}^2 \quad (2)$$

gdzie:

S m² - poprzeczny przekrój kanału.

Po uwzględnieniu wyrażenia (1) oraz zastąpieniu natężenia prądu przez gęstość prądu j otrzymuje się:

$$p_e = B \cdot j \cdot l \quad \text{N/m}^2 \quad (3)$$

gdzie:

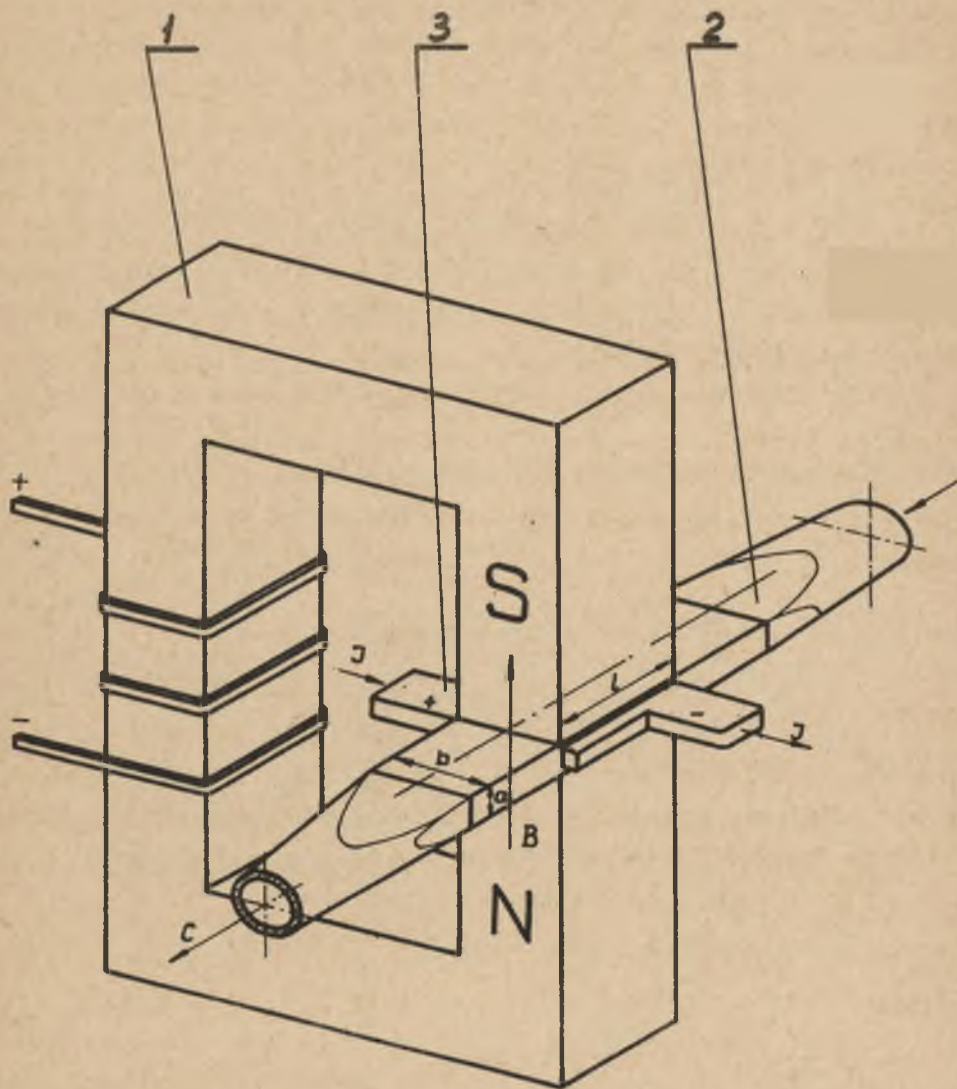
$j = \frac{I}{a \cdot l}$ A/m² - gęstość prądu.

Określone równaniem (3) ciśnienie elektromagnetyczne jest sumą ciśnienia użytecznego p i strat ciśnienia wewnątrz kanału Δp

$$p_e = p + \Delta p \quad \text{N/m}^2 \quad (4)$$

przy założeniu pompy idealnej $\Delta p = 0$, to wtedy

$$p_e = p \quad \text{N/m}^2 \quad (5)$$



Rys. 2. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna z kanałem liniowym
 1 - obwód magnetyczny, 2 - kanał, 3 - elektrody zasilające

Wydajność pompy określona jest wyrażeniem

$$Q = a \cdot b \cdot c \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (6)$$

gdzie:

a m; b m - wymiary kanału,
 c m/s - średnia prędkość ośrodka ciekłego w kanale.

W kanale pompy (pomiędzy elektrodami) powstaje na skutek wymuszonego ruchu ośrodka w polu magnetycznym - siła elektromotoryczna określona równaniem

$$E = c \cdot B \cdot b \quad \text{V} \quad (7)$$

po uwzględnieniu równania (6) otrzymuje się:

$$E = \frac{Q \cdot B}{a} \quad \text{V} \quad (8)$$

Do zacisków pompy doprowadzona jest moc

$$P_1 = U \cdot I \quad \text{W} \quad (9)$$

gdzie:

U V - napięcie elektryczne przyłożone do zacisków, kompensowane siłą elektromotoryczną i spadkiem napięcia na oporze ośrodka pomiędzy zaciskami.

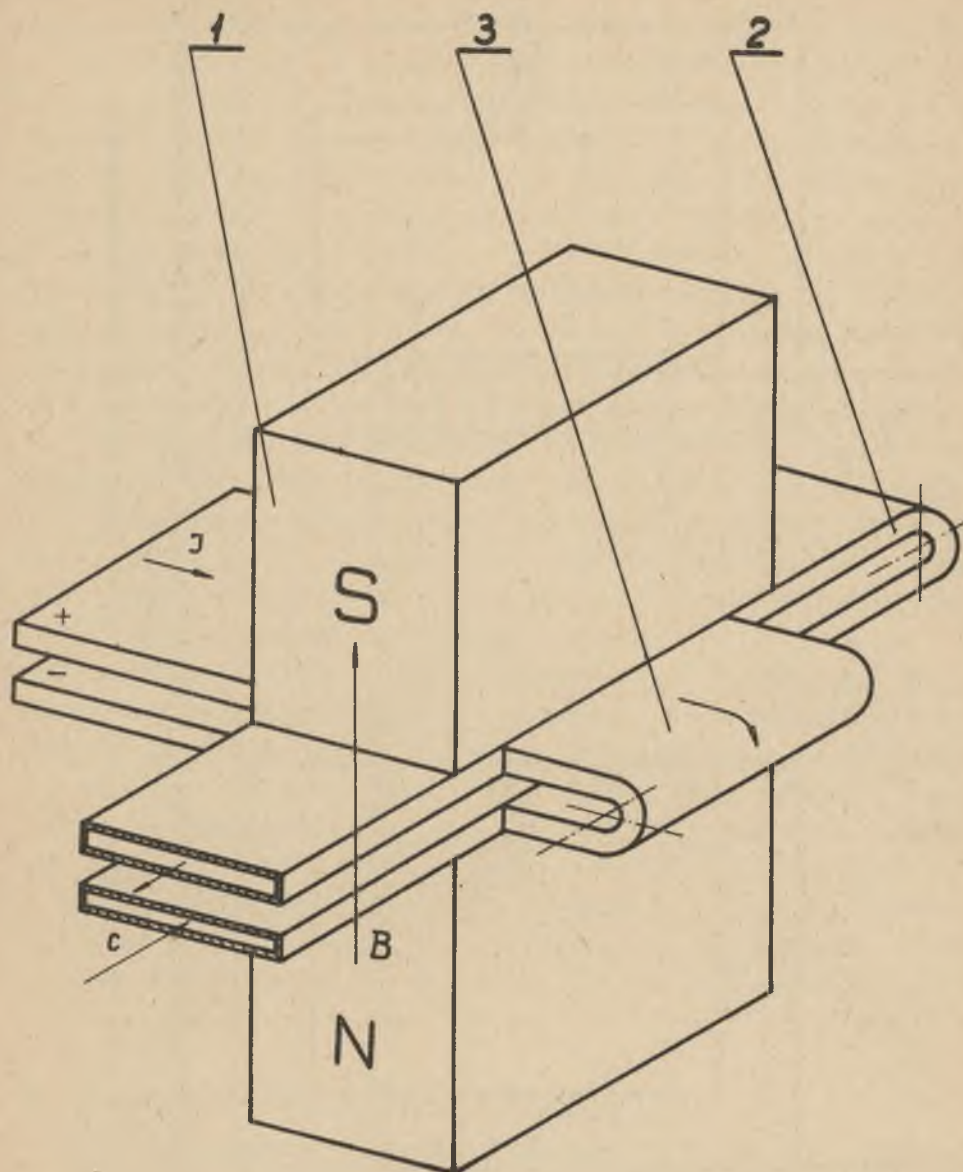
Moc użyteczna (hydrauliczna) wynosi:

$$P_2 = p \cdot Q \quad \text{W} \quad (10)$$

stąd sprawność pompy

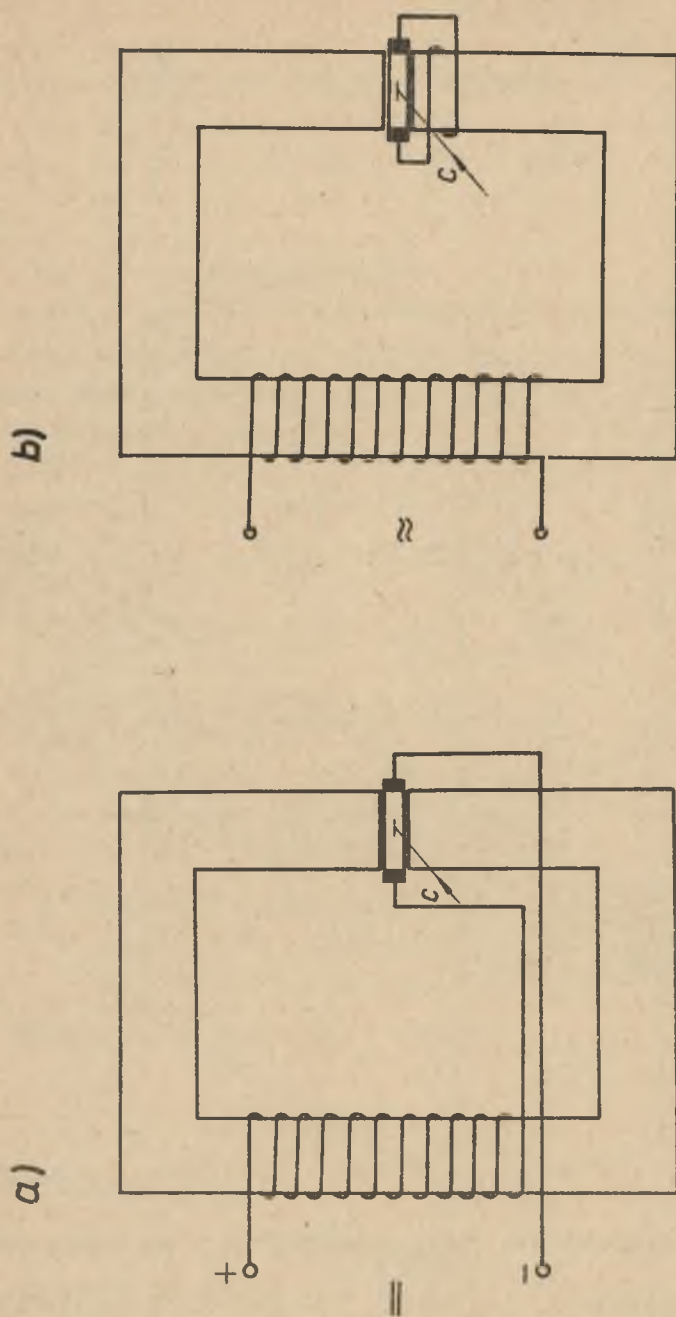
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (11)$$

W pompie rzeczywistej występują straty wynikające między innymi: z przepływu prądu przez ścianki kanału, przez ciekły ośrodek poza czynnym polem magnetycznym, z niejednorodności



Rys. 3. Elektromagnetyczna pompa przewodząca z kanałem pętlicowym

1 - obwód magnetyczny, 2 - kanał, 3 - elektrody zasilające



Rys. 4. Układ połączeń elektrycznych elektrod zasilających i uswojenia wytwarzającego pole magnetyczne
 a - przy zasileniu prądem stałym, b - przy zasileniu prądem przemiennym

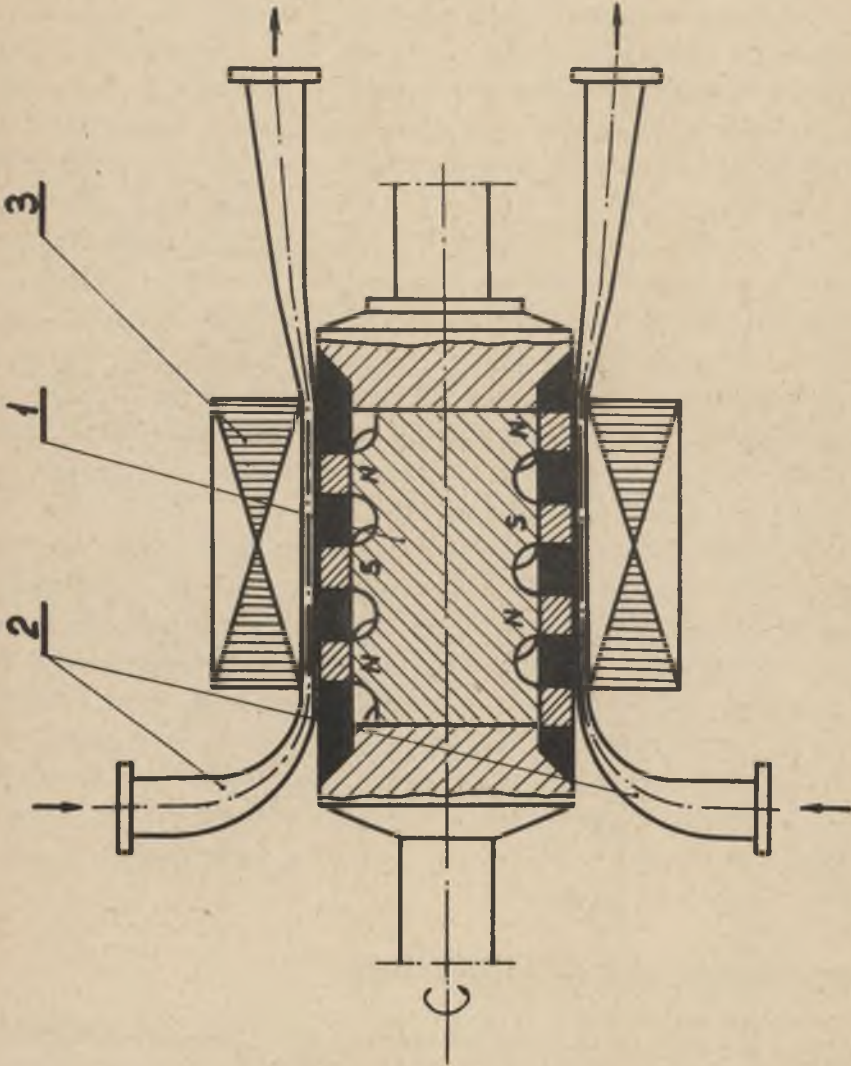
pola magnetycznego, oporów hydraulicznych, efektów brzegowych i innych. Straty te powodują ogólne obniżenie parametrów pompy wyliczonych według wyżej podanych wzorów. W związku z powyższym obecnie budowane pompy kondukcyjne zasilane prądem stałym posiadają sprawność około $\eta = 60\%$ [8]. Natomiast pompy kondukcyjne zasilane prądem przemiennym posiadają sprawność mniejszą, wynoszącą około $\eta = 15\%$. Maksymalna wydajność dotychczas zbudowanych pomp kondukcyjnych wynosi $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, przy ciśnieniu $p = 30 \cdot 10^4$ do $50 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i średniej prędkości przepływu ośrodka $c = 5$ do 12 m/s . Temperatura pompowanego czynnika zazwyczaj nie przekracza temperatury $t = 250$ do 800°C .

Pompy kondukcyjne odznaczają się możliwością bezstopniowej regulacji wydajności i wysokości podnoszenia, którą uzyskuje się przez zmianę elektrycznych parametrów urządzeń zasilających. Ze względu na konstrukcję pompy kondukcyjne prądu stałego i przemiennego dzielą się na pompy z kanałem liniowym (rys. 2) i pompy z kanałem pętlicowym (rys. 3).

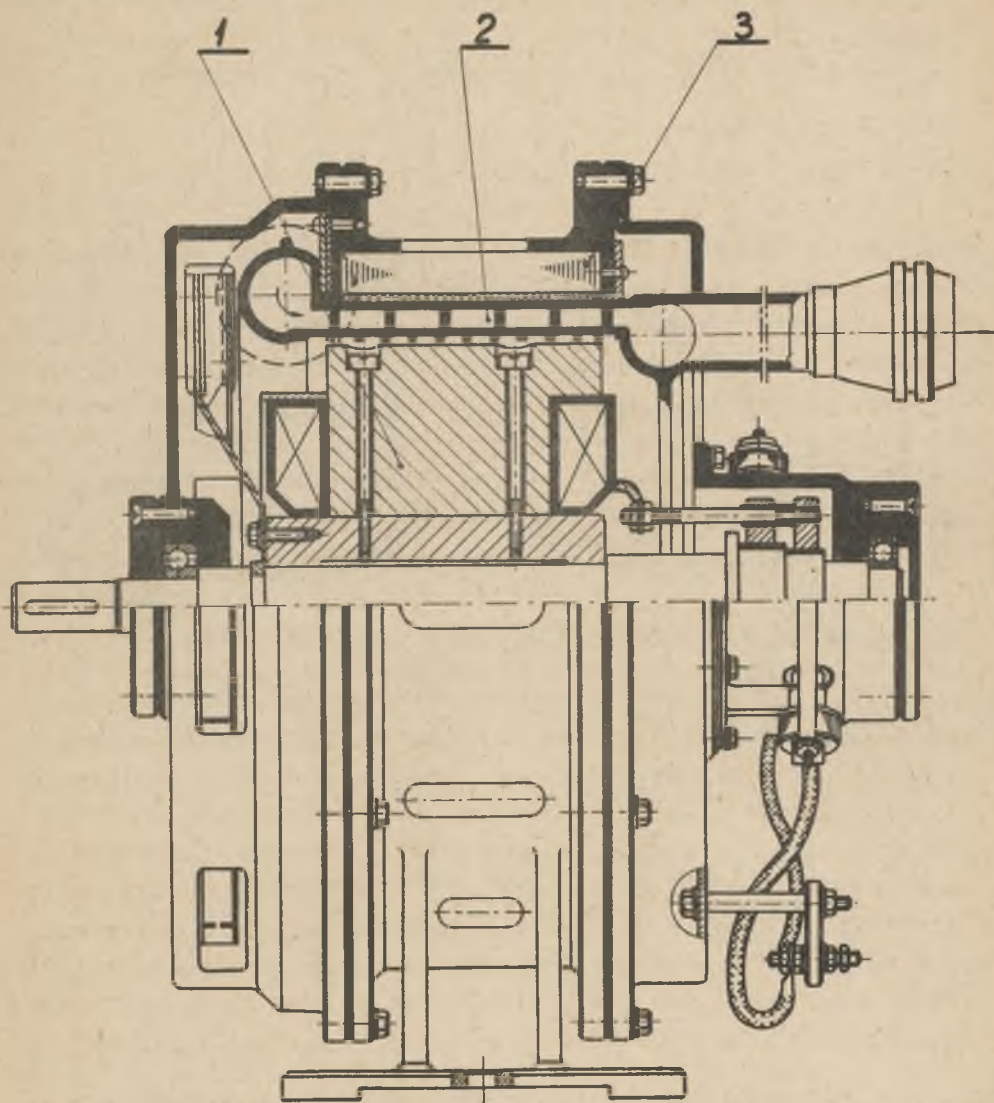
Sposób połączenia elektrycznego elektrod i uzwojenia wytwarzającego pole magnetyczne w zależności od rodzaju napięcia zasilającego (stałe bądź przemiennie) przedstawiono na rys. 4. Największe zastosowanie w praktyce znalazły pompy kondukcyjne zasilane prądem stałym [9]. Do zasilania pomp tego typu konieczne są jednak źródła prądu stałego o niskim napięciu prądu $U = 1 \text{ V}$ i wysokim natężeniu prądu sięgającym nawet do $I = 100000 \text{ A}$. Osiągana indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego wynosi $B = 0,4$ do $1,5 \text{ T}$ przy wysokości kanału wynoszącej nawet $a = 0,2 \text{ m}$.

3. Elektromagnetyczne pompy indukcyjne

Elektromagnetyczne pompy indukcyjne działają na zasadzie zbliżonej do pracy konwencjonalnych silników asynchronicznych z wirnikiem klatkowym [10]. Rolę stojana spełnia specjalnej konstrukcji uzwojony induktor a wirnika - pompowany czynnik. Induktor może być zasilany prądem stałym bądź przemiennym. Elektromagnetyczne pompy indukcyjne zasilane prądem stałym mogą posiadać kanał liniowy (rys. 5) bądź spiralny (rys. 6 i 7) a pom-

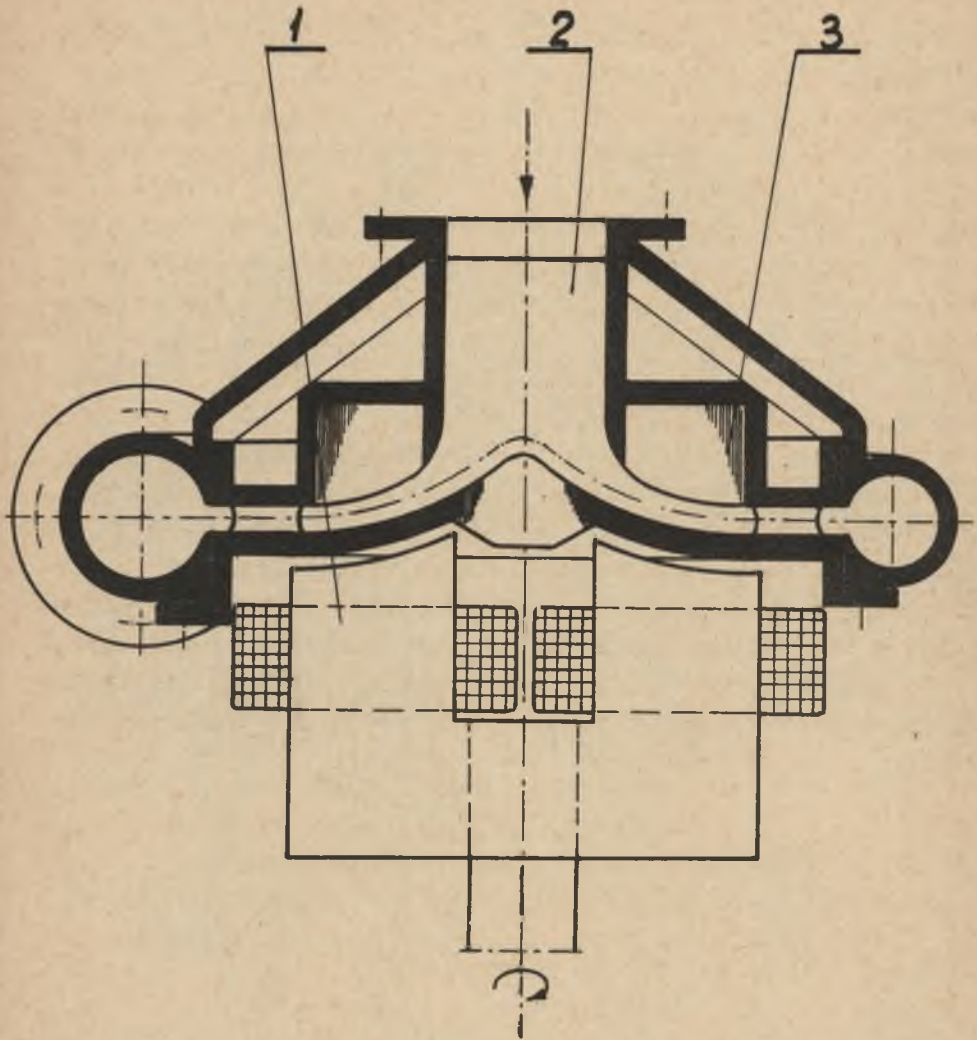


Rys. 5. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (jawnobiegunowa) z kanałem liniowym
 1 - wirnik z magnesem stałym, 2 - kanał, 3 - rdzeń magnetyczny



Rys. 6. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (jawnobiegunowa) z kanałem spiralnym w układzie poziomym

1 - wirnik z elektromagnesem, 2 - kanał, 3 - rdzeń magnetyczny



Rys. 7. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (jawnobiegunowa) z kanałem spiralnym w układzie pionowym

1 - wirnik z elektromagnesem, 2 - kanał, 3 - rdzeń magnetyczny

py zasilane prądem przemiennym - kanał liniowy (rys. 8), cylindryczny (rys. 9) bądź spiralny (rys. 10).

Ponadto z uwagi na budowę obwodu magnetycznego pompy indukcyjnej dzieli się na jawnobiegunowe, które mogą posiadać pole magnetyczne wytworzone przez magnes stały (rys. 5) bądź elektromagnes (rys. 6 i 7) i ukrytobiegunowy (rys. 8, 9 i 10). Największe zastosowanie znalazły elektromagnetyczne pompy indukcyjne z kanałem liniowym. W pompach tego typu trójfazowe uzwojenia ułożone są w żłobkach induktora w układzie jedno bądź dwuwarstwowym, przy zastosowaniu izolacji odpornej na podwyższoną temperaturę sięgającą do około $t = 1200^{\circ}\text{C}$. Uzwojenia te wytwarzają przemieszczające się pole magnetyczne, które indukuje siłę elektromotoryczną i prądy elektryczne w transportowanym czynniku, w odróżnieniu od pomp kondukcyjnych, gdzie przepływ prądu przez czynnik odbywa się wskutek galwanicznego zasilania. O wielkości siły elektromotorycznej i prądów indukowanych w transportowanym czynniku oraz związanych z tym parametrów hydraulicznych pompy decyduje przy założonej wielkości pola magnetycznego wytwarzanego przez trójfazowy induktor, tzw. poślizg określony równaniem

$$s = \frac{c_{es} - c}{c_{es}} \quad (12)$$

bądź

$$s = \frac{2 f \tau - c}{2 f \tau} \quad (13)$$

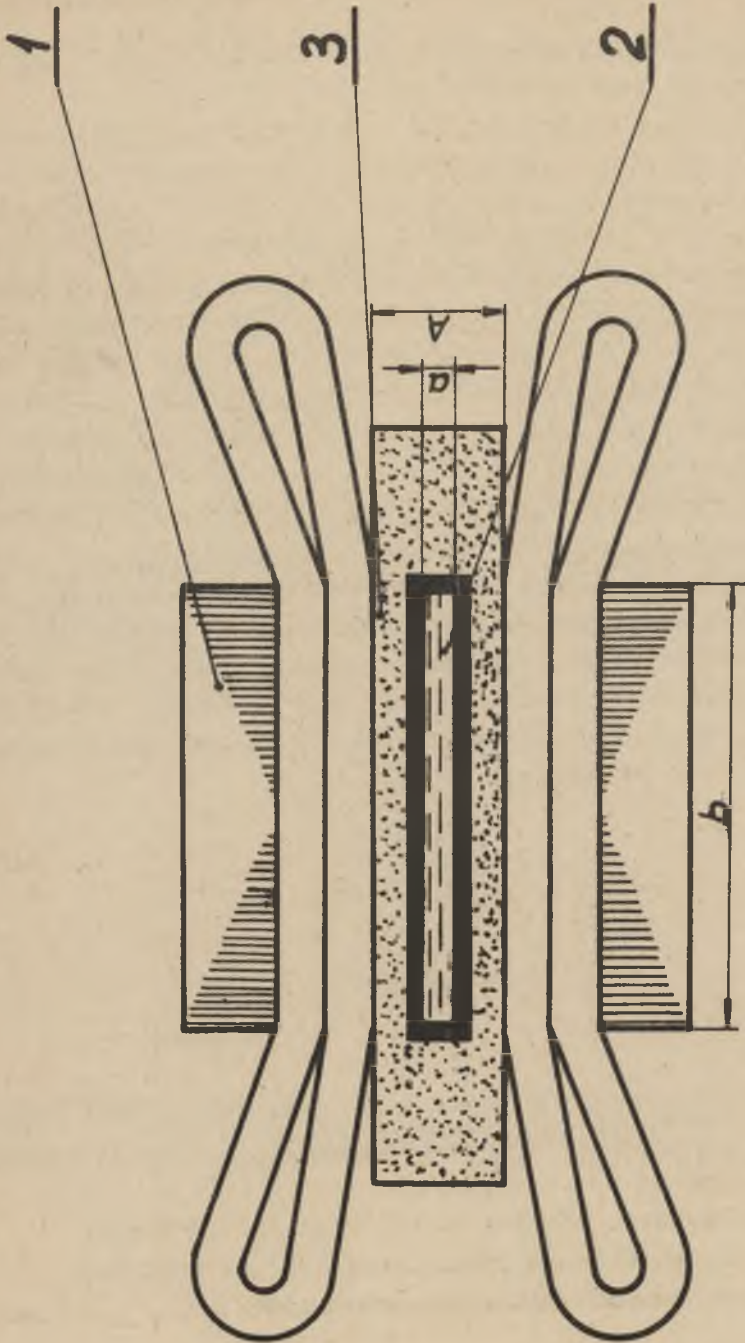
gdzie:

c_{es} m/s - prędkość (synchroniczna) pełzającego pola magnetycznego, określona konstrukcją uzwojenia induktora,

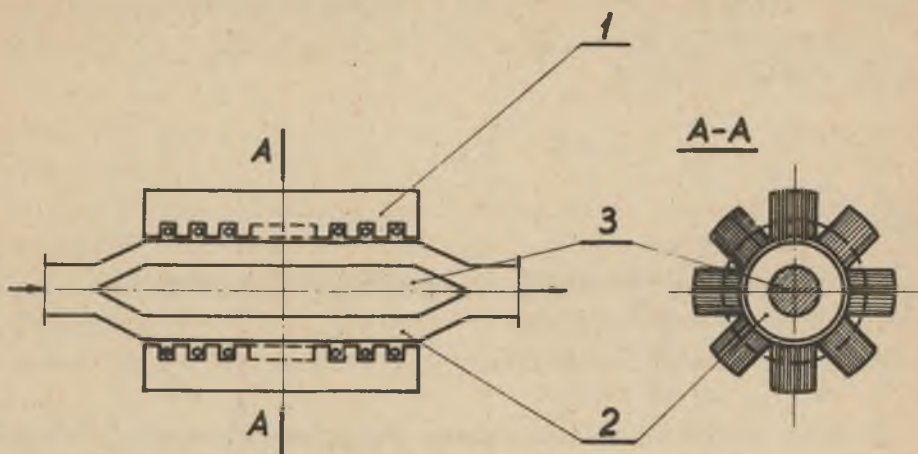
c m/s - średnia prędkość przetłaczanego czynnika,

f Hz - częstotliwość prądu zasilającego induktor,

τ m - podziałka biegunowa induktora.

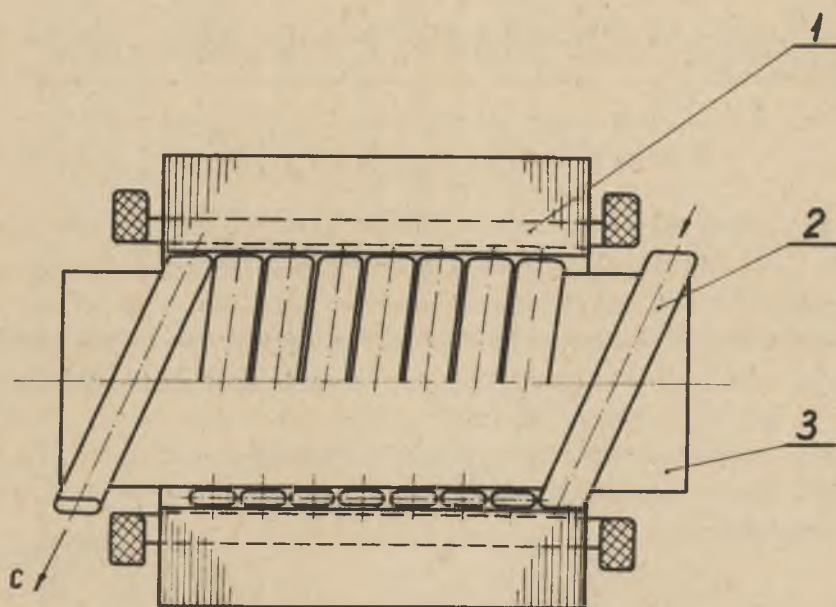


Rys. 8. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (ukrytobiegunowa) z kanałem liniowym
1 - induktor, 2 - kanał, 3 - izolacja termiczna



Rys. 9. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (ukrytobiegunowa) z kanałem cylindrycznym

1 - induktor, 2 - kanał, 3 - rdzeń magnetyczny



Rys. 10. Elektromagnetyczna pompa indukcyjna (ukrytobiegunowa) z kanałem spiralnym

1 - induktor, 2 - kanał, 3 - rdzeń magnetyczny

W pompie idealnej ($a = A$ według rysunku 5) średnia wartość siły elektromagnetycznej F_1 działającej w kanale na transportowany czynnik wynosi

$$F_1 = B_m^2 \cdot a \cdot b \cdot f \cdot l \cdot s \cdot \sigma \cdot \tau \quad \text{N} \quad (14)$$

gdzie:

- B_m T - amplituda indukcji magnetycznej w kanale,
- a m - wysokość kanału,
- b m - szerokość kanału,
- l m - długość kanału,
- σ S/m - przewodność właściwa (elektryczna) transportowanego czynnika,

Ponieważ ciśnienie w kanale wynosi

$$p = \frac{F_1}{a \cdot b} \quad \text{N/m}^2 \quad (15)$$

stąd ciśnienie średnie działające w kanale pompy określa się z zależności:

$$p = B_m^2 \cdot f \cdot l \cdot s \cdot \sigma \cdot \tau \quad \text{N/m}^2 \quad (16)$$

W pompie rzeczywistej średnie ciśnienie występujące w kanale pompy jest mniejsze na skutek: upływu prądu elektrycznego przez ścianki kanału, występowania w kanale pompy strat hydraulicznych, tzw. efektów brzegowych oraz demagnesującego działania prądów wirowych powstałych w transportowanym czynniku [8] [11]. W tym przypadku sprawność pompy wynosi około $\eta = 30$ do 45% przy współczynniku przesunięcia fazowego $\cos \varphi = 0,4$ do 0,6 i poślizgu $s = 0,3$ do 0,5. Natomiast wydajność pompy określona jest równaniem:

$$Q = a \cdot b \cdot c \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (17)$$

Moc elektryczna (czynna) oddawana do transportowanego czynnika wynosi

$$P_e = p \cdot Q \frac{s}{1-s} \quad W \quad (18)$$

bądź

$$P_e = \frac{B_m^2 \cdot c_p^2 \cdot V \cdot \sigma}{2} \quad W \quad (19)$$

gdzie:

$V \text{ m}^3$ - objętość transportowanego czynnika w czynnym kanale,

$c_p = 2 \cdot f \cdot s \cdot \tau \text{ m/s}$ - różnica prędkości c_{es} i c .

Całkowitą sprawność pompy oblicza się z równania

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (20)$$

gdzie:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad W$$

$U \text{ V}$ - napięcie zasilania induktora,

$I \text{ A}$ - natężenie prądu induktora,

φ - kąt przesunięcia fazowego.

W porównaniu z pompami kondukcyjnymi, pompy indukcyjne posiadają kanały o uproszczonej konstrukcji ze względu na brak elektrod zasilających i dlatego mogą znaleźć zastosowanie do transportu ciekłych metali jak np. żeliwo i inne.

Wysokość kanału w pompach indukcyjnych wynosi od $a = 5 \cdot 10^{-3}$ do $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, a indukcja magnetyczna wewnątrz kanału osiąga wartość $B = 0,3$ do $0,4 \text{ T}$. Zaletą pomp indukcyjnych jest możliwość ich zasilania bezpośrednio z sieci przemysłowej. Pompy indukcyjne są szczególnie przydatne do pracy przy dużych wydajnościach Q rzędu kilku m^3/s i małych ciśnieniach p rzędu kilku N/m^2 .

4. Kierunki dalszych prac badawczych

Pompy elektromagnetyczne są stosowane w technice jądrowej i w metalurgii do transportu metali w stanie ciekłym. Ponadto prowadzone są prace nad zastosowaniem pomp elektromagnetycznych zasilanych przez termoelementy uzyskujące energię z przepływającego ciekłego metalu. Obecnie prowadzone są również badania pomp elektromagnetycznych przystosowanych do przetłaczania krwi przy operacjach serca [13]. Tego typu pompy mogą być również zastosowane w przemyśle chemicznym do transportu ciekłego sodu, rtęci i elektrolitów. Według przeprowadzonych rozważań przez Katedrę Maszyn Hydraulicznych i Powietrznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach w krajowym przemyśle chemicznym będą potrzebne pompy elektromagnetyczne między innymi do transportu rtęci w elektrolitycznej produkcji chloru o następujących parametrach: wydajność około $Q = 25$ do 100 l/min, wysokość podnoszenia $H = 3$ do 5 m przy temperaturze ośrodka około $t = 100^{\circ}\text{C}$.

W Katedrze Maszyn Hydraulicznych i Powietrznych Politechniki Śląskiej prowadzone są prace doświadczalno-konstrukcyjne nad zastosowaniem pomp elektromagnetycznych do transportu amalgamatów i innych ośrodków o dobrej przewodności elektrycznej.

LITERATURA

- [1] ZARZYCKI M., GRZYCHOWSKI J., ROKITA J. - Koncepcja klasyfikacji pomp wirowych dla celów przemysłowych. Gliwice 1969. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka nr 30.
- [2] ZARZYCKI M., KORCZAK A. - Koncepcja klasyfikacji pomp specjalnych dla celów przemysłowych, Gliwice, 1970. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka nr 36.
- [3] GARRIS L. - Magnitogidrodinamiczjeskije tjeczjenija w kanałach. Moskwa, Izdatjelstwo inostrannoj literatury, 1963.
- [4] LIJELAUSIS O.A. - Gidrodinamika židkomjetažliczjeskich MGD ustrojstw. Riga "Zinatnje" 1967.
- [5] KANIA E., SZELOCH A., GŁADYSZ M. - Silniki elektryczne tarczowe i liniowe, Gliwice, Mechanizacja Górnictwa, zeszyt 27 1969.

- [6] WIRZWAŁK A. - Osnowy tjeorii i rasczjeta kondukcjonnych MGD-nasosow postojannogo toka. Riga "Zinatnje" 1968.
- [7] GAJEWSKI Z. - Międzynarodowy układ jednostek miar. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, 1966.
- [8] WOLDJEK A.I. - Eljektromagnitnyje nasosy dlja židkich mjetalłow. Eljektriczjestwo Nr 5, 1960.
- [9] THOMSON G.W., GARELIS E. - The Physical and Thermodynamic Properties of Sodium, New York, ACS 1956.
- [10] OCHRJEMJENKO N.M. - Osnowy tjeorii i projektirowanija liniejnych indukcionnych nasosow dlja židkich mjetalłow. Moskwa, Atomizdat 1968.
- [11] OCHRJEMJENKO N.M. - Eljektromagnitnyje jawlenija w płoskich indukcionnych nasosach dlja židkich mjetalłow. Eljektriczjestwo nr 3, 1960.
- [12] KAŁNIN T.K. - Jawnopoljusnyje MGD-nasosy, Izdatjelstwo "Zinatnje" Riga 1969.
- [13] Thermoelektromagnetische Pumpe. Elektrie Nr 10, 1968.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЧЕСКИЕ НАСОСЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТА
ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Р е з ю м е

В статье представлено основное решение электромагнетических насосов для транспорта жидких металлов. Указано разделение этих насосов, принимая во внимание принцип действия, тип примененного электрического тока и конструкцию канала, которым протекает транспортируемое вещество. Обращено внимание на экспериментально-конструкторские работы, которые ведутся на Кафедре Гидравлических и Воздушных Машин в области электромагнетических насосов.

**ELECTROMAGNETIC PUMPS FOR TRANSPORTATION
OF LIQUID METALS****S u m m a r y**

The paper describes the latest basic solution of electromagnetic pumps for transportation of liquid metals. There is indicated the division of these pumps taking into consideration their principle of operation, type of the electromagnetic current used and construction of the passage where the transported agent flows. Works being carried out in the Department of Hydraulic and Pneumatic Machines in the field of electromagnetic pumps are taken into consideration.