

Marian BROŻEK, Witold PAWŁOS
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

ANALIZA RUCHU ZIARNA W SEPARATORZE MAGNETOGRAWIMETRYCZNYM (MGM)

Streszczenie. Warunkiem separacji surowców w cieczach ferromagnetycznych jest zróżnicowanie argumentów rozdziału poszczególnych składników nadawy. Argument rozdziału dla separacji MGM jest funkcją własności fizycznych zarówno cieczy ferromagnetycznej, jak i ziarna. W artykule podano analizę ruchu ziarna w separatorze MGM z uwzględnieniem jego własności magnetycznych. Analizę ruchu ziarna oparto na rozwiązaniu równania Hamiltona-Jacobiego dla punktu materialnego o określonych własnościach fizycznych.

THE ANALYSIS OF PARTICLE MOTION IN MAGNETOGRAVIMETRIC (MGM) SEPARATOR

Summary. The condition of raw material separation in ferromagnetic liquids is differentiation of division arguments of particular constituents of the feed. The division argument of MGM separation is the function of physical properties of the ferromagnetic liquid and particle. In the paper the analysis of particle motion in MGM separator, taking into consideration its magnetic properties, is given. The analysis of particle motion is based on the solution of the Hamilton - Jacobi equation for material point with determined physical properties.

1. Wstęp

Wiek XX, a w szczególności jego schyłek, spowodował gwałtowny rozwój wszelkiego rodzaju technologii przemysłowych. Wzrosło zapotrzebowanie na surowce kopalne w szczególności na rudy metali i surowce energetyczne. Zaczęły rozwijać się zakłady wydobywcze i wzbogacające. W konsekwencji spowodowało to zmniejszenie się ilości kopalin o bardzo dobrych parametrach i jednocześnie zwiększanie się odpadów. Coraz częściej korzysta się ze

złóż o niskiej zawartości składnika użytecznego - prowadzi to do badań nad nowymi metodami wzbogacania.

Do stosunkowo nowych metod wzbogacania można zaliczyć:

- metodę separacji magneto hydrodynamicznej (MHD),
- metodę separacji magneto hydrostatycznej (MHS),
- metodę separacji magneto grawimetrycznej (MGM).

2. Ogólne zasady rozdzielania mieszanin w ośrodkach magnetycznych

Separację MGM lub MHS przeprowadza się w cieczach magnetycznych umieszczonych w niejednorodnym polu magnetycznym.

Cieczami pełniącymi rolę mediów rozdzielających mieszaniny ziarnowe substancji diamagnetycznych lub paramagnetycznych są wodne roztwory silnie paramagnetycznych soli różnych metali. Najczęściej korzysta się z roztworów soli manganu ($MnCl_2$), niklu, żelaza, kobaltu.

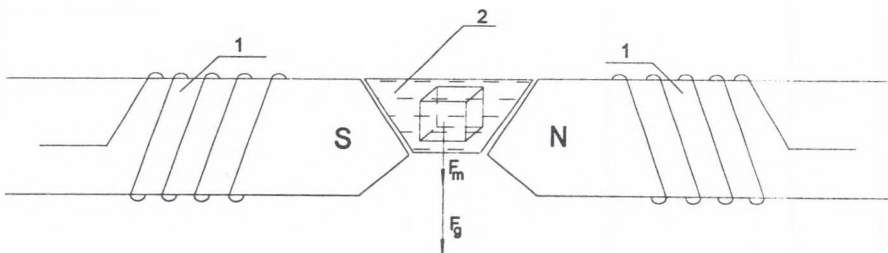
Na jednostkę objętości izotropowego i jednorodnego roztworu takiej soli, która wykazuje własności cieczy paramagnetycznej umieszczonej w niejednorodnym polu magnetycznym działa siła wypadkowa \vec{f} (rys.1).

$$\vec{f} = \vec{f}_m + \vec{f}_g \quad (1)$$

gdzie:

$$\vec{f}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi_0 (\text{grad} H^2) - \text{siła magnetyczna,}$$

$$\vec{f}_g = \rho_0 \cdot g - \text{siła grawitacji.}$$



Rys.1. Schemat ideowy separatora MHS 1- nabiegunniki elektromagnesu, 2- ciecz magnetyczna
Fig.1. Schematic diagram of MHS separator: 1 - pole pieces of electromagnet, 2 - magnetic fluid

Natomiast efektywny ciężar właściwy cieczy γ_e jest równy:

$$\gamma_e = \rho_o g + \frac{1}{2} \mu_o \chi_o (\text{grad } H^2), \quad (2)$$

w przypadku gdy wektor gradientu pola magnetycznego jest kierowany pionowo w dół, zaś kanał wypełniony cieczą paramagnetyczną umieszczony jest poziomo. Jeśli separowane cząstki będą niemagnetyczne, wtedy rozdział następuje według ich ciężarów właściwych, tak jak w cieczach ciężkich.

Jeżeli rozdzielane cząstki mają oprócz różnicy ciężaru właściwych różne podatności magnetyczne, wystąpi dodatkowa siła magnetyczna działająca na ziarno, która wzmacnia efekt stratyfikacji produktów rozdziału w cieczy roboczej, wpływając na poprawę wydzielanych frakcji.

$$f = (\rho - \rho_o) g + \frac{1}{2} \mu_o (\chi - \chi_o) \text{grad } H^2 \quad (3)$$

gdzie:

ρ - gęstość ziarna,

ρ_o - gęstość cieczy,

g - przyspieszenie ziemskie,

χ - podatność magnetyczna ziarna,

χ_o - podatność magnetyczna cieczy,

H - natężenie pola magnetycznego,

μ_o - przenikalność magnetyczna próżni.

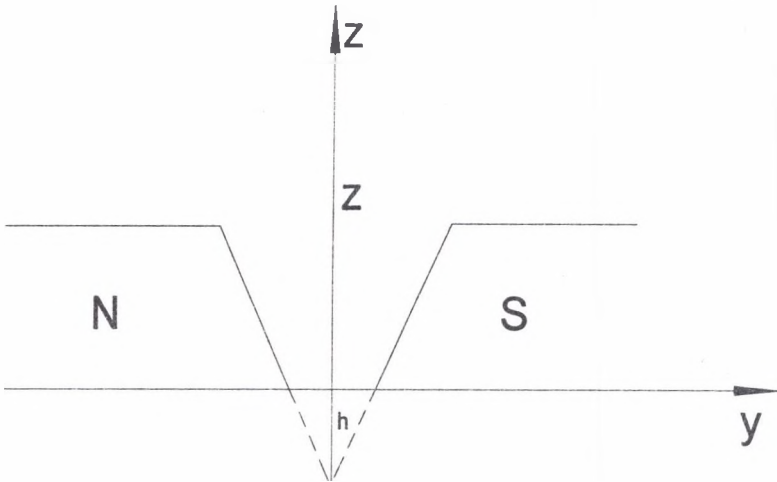
Rozkład ziarn rozdzielanej mieszaniny wzdłuż osi pionowej będzie następował w oparciu o różnicę następującego argumentu rozdziału

$$\Phi = \frac{|(\rho - \rho_o)g|}{\chi_o - \chi} = \frac{1}{2} \mu_o |\text{grad } H^2| \quad (4)$$

Warunkiem istnienia rozdziału dwóch składników jest różnica argumentów Φ -tych składników. Na tym samym poziomie będą się koncentrować ziarna cięższe z niską podatnością magnetyczną i ziarna lekkie z dużą podatnością magnetyczną.

Teoretyczny rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora w kształcie klina (rys.2) wyraża się wzorem:

$$H(z) = \frac{h H_o}{h + z} \quad (5)$$



Rys.2. Nabiegunniki w kształcie klina
Fig.2. The wedge shape pole pieces

W związku z czym efektywny ciężar właściwy cieczy na poziomie z jest równy:

$$\gamma_{ef} = \rho_o g + \frac{\mu_o \chi_o H_o^2 h^2}{(h + z)^3} \quad (6)$$

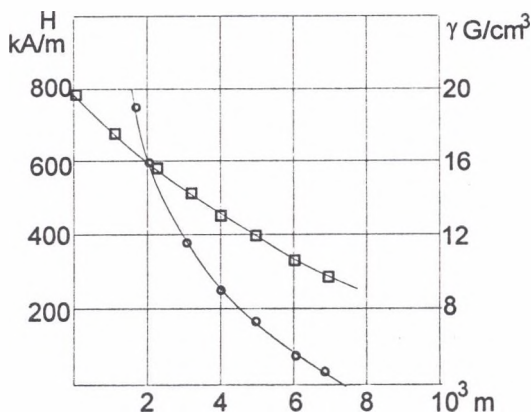
gdzie:

H_o - natężenie pola magnetycznego na dnie przestrzeni roboczej

h - odległość od wierzchołka klina do dna przestrzeni

M - magnetyzacja cieczy

Separacja w cieczach paramagnetycznych zdaje egzamin dla ciężarów właściwych mieszczących się w granicach (1500-3000) $9,81 \text{ N/m}^3$. Mieszaniny materiałów o wyższych ciężarach właściwych nie mogą być rozdzielane za pomocą tych cieczy.



Rys. 3. Rozkład pola magnetycznego i ciężaru właściwego cieczy ferromagnetycznej
 Fig.3. The distribution of magnetic field and specific weight of ferromagnetic liquid

3. Ciecze ferromagnetyczne

Badania nad rozszerzeniem zakresu osiągniętych efektywnych ciężarów właściwych rozdziału prowadził w 1965 roku Papell, który opatentował sposób otrzymywania nowej koloidalnej zawiesiny ferromagnetycznej. Sposób ten polegał na długotrwałym (kilka miesięcy) mieleniu magnetytu Fe_3O_4 w młynach kulowych z dodatkiem nafty i kwasu oleinowego.

W 1972 roku Reimers i Khalafalla opracowali metodę chemicznego otrzymania zawiesiny ferromagnetycznej opartej na reakcji Le Forta:



Sposób otrzymywania koloidu ferromagnetycznego opatentowali także pracownicy AGH: Wł. Pilch, K. Nowakowski, R. Winiarski. Polega on na wytwarzaniu koloidu z wodnych roztworów soli żelazowych i żelazawych [5].

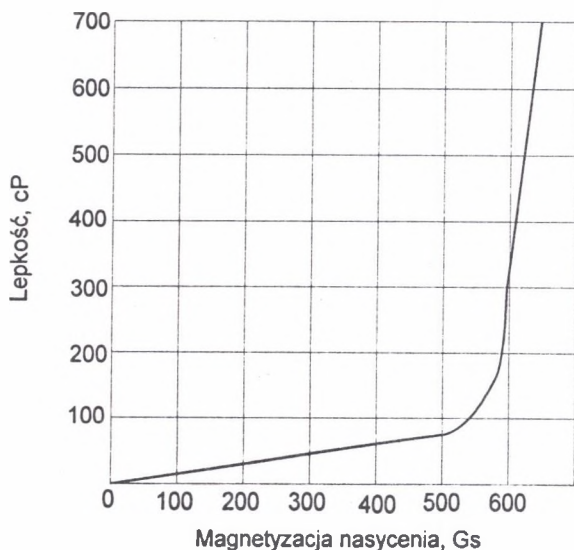
Powstające z powyższej reakcji drobinę magnetytu muszą zostać w kontrolowany sposób skoagulowane (rozmiary drobin Fe_3O_4 mieszczą się w granicach (8-30) 10^{-9}m). Tak drobno zdyspergowane cząstki magnetytu muszą zostać ustabilizowane w cieczy nośnej (nafta), aby

nie uległy sedymentacji zarówno grawitacyjnej, jak i pod wpływem bardzo silnego pola magnetycznego. Jako stabilizatora używa się kwasu oleinowego.

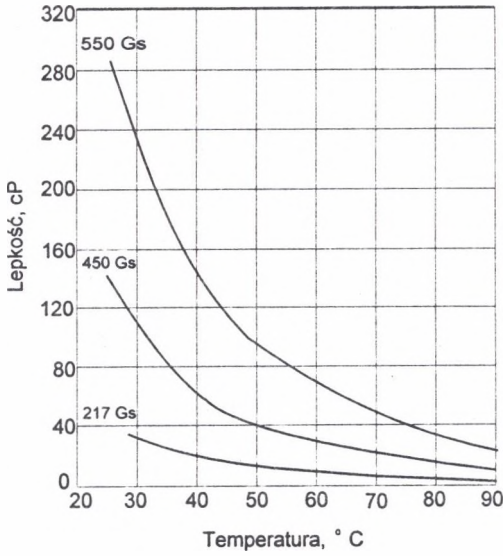
Wytworzona w ten sposób ciecz, poddana operacjom czyszczącym i obróbce termicznej, ma ściśle określone cechy fizyczne (magnetyczne). Ciecze ferromagnetyczne są nieprzezroczyste, koloru czarnego i o silnym zapachu nafty.

4. Właściwości cieczy ferromagnetycznych

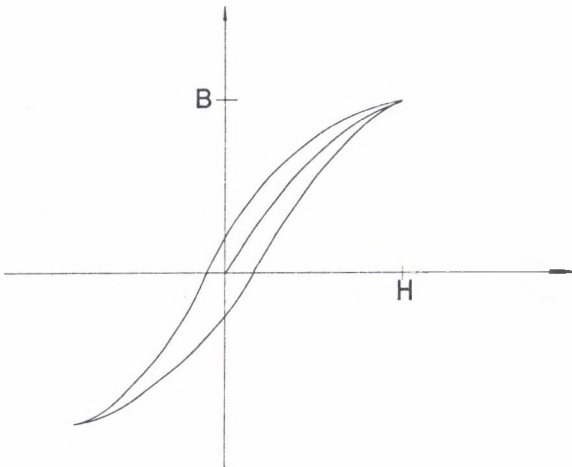
W zależności od sposobu otrzymywania cieczy ferromagnetycznych, ich gęstości leżą w granicach 920-960 Mg/m³, lepkość waha się w granicach (2,10-2,25) 10⁻³Ns/m² (temp. 25°C) i nieznacznie wzrasta w obecności pola magnetycznego. Zmianę lepkości w zależności od magnetyzacji nasycenia (temp.= const) oraz zmianę lepkości dla różnych temperatur pokazano na rys. 4 i 5. Są to rozkłady doświadczalne, w których rolę cieczy nośnej sprawuje woda, diester i nafta.



Rys. 4. Zależność lepkości ferrokoloidów od ich magnetyzacji nasycenia (temp.= const)
Fig.4. Viscosity of ferrofluids vs. saturation magnetization (temp. = const)



Rys. 5. Zależność lepkości różnych ferrokoloidów od temperatury
 Fig.5. Viscosity of different ferrofluids vs. temperature



Rys. 6. Pętla histerezy dla koloidów ferromagnetycznych
 Fig.6. Hysteresis loop of ferrofluids

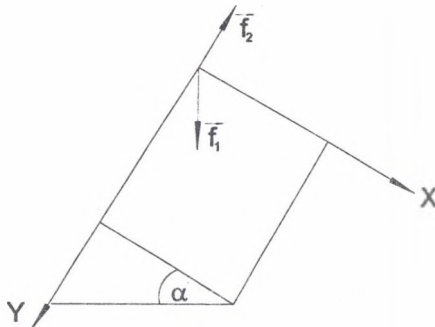
Z fizycznego punktu widzenia koloidy ferromagnetyczne są magnetycznie „miękkie” i wykazują minimalny efekt histerezy (rys.6). W celu określenia właściwości magnetycznych wyprodukowanych cieczy ferromagnetycznych jako decydujących w procesach separacji, zdjęto szereg charakterystyk [2]. W przestrzeni roboczej separatora o kształcie jak na rys.1, określono rozkład pola magnetycznego i ciężaru właściwego cieczy ferromagnetycznej (rys.3).

Prace o możliwościach zastosowania rozdzielania (separacji) w cieczach ferromagnetycznych w skali laboratoryjnej prowadzone są Zakładzie Przeróbki Utylizacji Odpadów i Ochrony Środowiska AGH. Z pozytywnym skutkiem zostały rozdzielane złomy metali kolorowych (Al., Pb, Cu). Możliwości tej metody (MGM) są duże i wymagają dalszych badań w skali laboratoryjnej.

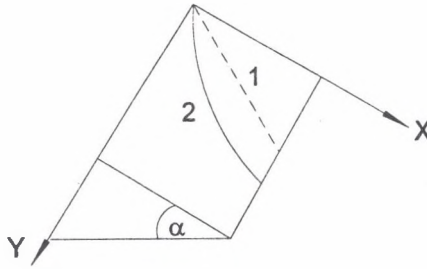
5. Tor ruchu ziarna w separatorze MGM

Na rys.7 przedstawiono układ sił działających na punkt materialny znajdujący się w przestrzeni roboczej separatora MGM nachylonego pod kątem α do poziomu, wraz z prostokątnym układem współrzędnych. Tor ruchu ziarna (rys.8) wyliczono dla dwóch przykładów pól w przestrzeni roboczej separatora:

- poła, w którym $\text{grad } \bar{H}^2 = \text{const} = K$ oraz
- $\text{grad } \bar{H}^2 = 2Ky + K_0$.



Rys.7. Układ sił działających w separatorze MGM
Fig.7. System of forces acting in MGM separator



Rys.8. Tor ruchu ziarna w separatorze MGM
 Fig.8. Trajectory of particle in MGM separator

W obu tych przypadkach tor ruchu ziarna można wyznaczyć efektywnie. Tor ruchu ziarna wyznaczono rozwiązując równanie Hamiltona - Jacobiego, które w płaskim, prostokątnym układzie współrzędnych dla zachowawczego pola sił ma postać [6]:

$$H\left(x, y, \frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}\right) = E \tag{7}$$

gdzie:

H=T+V - funkcja Hamiltona,

T - energia kinetyczna,

V- potencjał,

W - działanie zredukowane, związane z pędem zależnością: $p_x = \frac{\partial W}{\partial x}$, $p_y = \frac{\partial W}{\partial y}$

Funkcja Hamiltona, dla przypadku a), gdy $grad \bar{H}^2 = K$, jest następująca

$$H = \frac{p_x^2}{2\rho} + \frac{p_y^2}{2\rho} - (\rho - \rho_0) \cdot xg \sin \alpha - (\rho - \rho_0) gy \cos \alpha + Cy = E \tag{8}$$

gdzie: $C = \frac{1}{2} \mu_0 (\chi_0 - \chi) K$, E - stała energia układu.

Wobec powyższego równanie Hamiltona - Jacobiego ma postać:

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial W_x}{\partial x}\right)^2 - (\rho - \rho_0)gx \sin \alpha + \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 - [(\rho - \rho_0)g \cos \alpha - C]y = E, \tag{9}$$

Po separacji zmiennych uzyskuje się dwa równania różniczkowe zwyczajne:

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{dW_x}{dx}\right)^2 - (\rho - \rho_0)gx \sin \alpha = \alpha, \tag{10a}$$

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{dW_y}{dy} \right)^2 - [((\rho - \rho_0)g \cos \alpha)]y = E - \alpha_1 \quad (10b)$$

gdzie: α_1 - stała

Działanie zredukowane jest równe:

$$W(x, y, \alpha_1, E) = W_x(x, \alpha_1, E) + W_y(y, \alpha_1, E) \quad (11)$$

Po rozwiązaniu równania (10) otrzymuje się:

$$W = \int \sqrt{2\rho\alpha_1 + 2\rho(\rho - \rho_0)gx \sin \alpha} \, dx + \int \sqrt{2\rho(E - \alpha_1) + 2\rho[((\rho - \rho_0)g \cos \alpha - C)]y} \, dy \quad (12)$$

równanie toru uzyskuje się z zależności

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha_1} = \beta \quad (13a)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha_1} = \int \frac{\rho \, dx}{\sqrt{2\rho\alpha_1 + 2\rho(\rho - \rho_0)gx \sin \alpha}} - \int \frac{\rho \, dy}{\sqrt{2\rho(E - \alpha_1) + 2\rho[((\rho - \rho_0)g \cos \alpha - C)]y}} = \beta \quad (13b)$$

gdzie: β - stała

Po obliczeniu całek [7] i przekształceniu dla $\beta=0$ otrzymuje się:

$$y = \frac{\left[(\rho - \rho_0)g \cos \alpha - \frac{1}{2} \mu_0 (\chi_0 - \chi) K \right]}{(\rho - \rho_0)g \sin \alpha} x \quad (14)$$

Jest to, jak należało się spodziewać, równanie prostej, której nachylenie zależy od właściwości fizycznych poruszającego się punktu (ρ, χ) , własności fizycznych cieczy (ρ_0, χ_0) oraz rozkładu pola magnetycznego (K) . Parametry toru ruchu są więc zależne od powyższych zmiennych.

Dla przypadku „b” równanie Hamiltona - Jacobiego oraz równanie toru są następujące:

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 - [(\rho - \rho_0)g \sin \alpha]x + \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 - [(\rho - \rho_0)gy \cos \alpha - C_1 y - C y^2] = E \quad (15)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha_1} = \int \frac{\rho \, dx}{\sqrt{2\rho\alpha_1 + 2\rho(\rho - \rho_0)gx \sin \alpha}} - \int \frac{\rho \, dy}{\sqrt{2\rho(E - \alpha_1) + 2\rho[-(\rho - \rho_0)gy \cos \alpha + C_1 y + C y^2]}} = \beta \quad (16)$$

Po wyliczeniu powyższych całek i przekształceniu dla $\beta = 0$ uzyskuje się:

$$y = \sqrt{\frac{2\rho(E - \alpha_1) + \frac{(\rho - \rho_0)^2 g^2 \cos^2 \alpha}{4C^2}}{2\rho C}} \sin \left\{ \frac{\sqrt{2\rho C [2\rho(\rho - \rho_0)g \sin \alpha]x + 2\rho\alpha_1}}{\rho(\rho - \rho_0)g \sin \alpha} \right\} \quad (17)$$

gdzie:

$$C = \frac{1}{2} \mu_0 (\chi - \chi_0) K$$

Torem ruchu jest więc odcinek sinusoidy. Dla rozkładu pola wyrażonego wzorem (5) równanie toru wyrazi się wzorem:

$$\frac{\sqrt{[2\rho(\rho - \rho_0)g \sin \alpha]x + 2\rho\alpha_1}}{(\rho - \rho_0)g \sin \alpha} - \int \frac{\rho dy}{\sqrt{2\rho(E - \alpha_1) - 2\rho(\rho - \rho_0)gy \cos \alpha + \frac{\rho C}{y^2}}} = \beta \quad (18)$$

gdzie: $C = \mu_0 (\chi - \chi_0)$

Stała α_1 w powyższych wzorach wyznacza się z warunków brzegowych. Tor ruchu ziarna w rzeczywistych warunkach separacji MGM jest funkcją własności fizycznych cieczy i ziarna oraz rozkładu pola magnetycznego. Zmieniając parametry pola magnetycznego można modelować tor ruchu w zależności od własności fizycznych ziarna.

LITERATURA

1. Brożek M., Nowakowski K.: Separacja magnetograwimetryczna (MGM) w przeróbce surowców mineralnych. Przegląd Górniczy 1985, nr 41, s. 255 - 260, 378 - 380.
2. Brożek M. i in.: O możliwościach zastosowania cieczy ferromagnetycznej do odzyskiwania metali kolorowych ze złomów. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii 1987, 19, s. 259-268.
3. Brożek M.: Rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora MHS. Górnictwo 1981, nr 5, s. 181-187.
4. Khalafalla S.E., Reimers G.W.: Magnetofluid and their manufacture. US Patent nr 3813540, 1973.

5. Pilch Wł. i in.: Sposób wytwarzania koloidu ferromagnetycznego Patent RP nr 265840, 1991.
6. Landau L., Lifszic E.: Mechanika. PWN, Warszawa 1966.
7. Ryzik I.M., Gradstein L.S.: Tablice całek, sum, szeregów i iloczynów. PWN, Warszawa 1964.

Abstract

Separation in ferromagnetic liquids is a relatively young method of enrichment. It is carried out on the base of two physical properties: density and magnetic susceptibility of liquid and particle. This is expressed by synthetic argument for MGM separation. Trajectory of particle depends on mentioned above properties of liquid and particle.

In the paper principles of separation in ferromagnetic liquids are given as well as synthetic argument of separation is determined. Moreover, the properties of ferromagnetic liquids are discussed. The basic part of paper makes the solution of Hamilton - Jacobi equation for two cases of magnetic force : $\text{grad } H^2 = \text{const.}$ and $\text{grad } H^2 = 2 K y + K_0$. The solution of equation makes the trajectory of material point in working zone of MGM separator. In the first case the trajectory is expressed by the straight line, while in the second case by a section of sinusoid. Physical properties of liquid and particle appear as the parameters of trajectory equations.