

**UOT 541.8****MAYE METALLARIN DİNAMİK ÖZLÜLÜYÜNÜN SƏCİYYƏVİLİYİ****E.Ə.EYVAZOV\*, E.Ə.MƏSİMOV\*\*, A.B.İBRAHİMLİ\****\*Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti**\*\*Bakı Dövlət Universiteti**AygunIbrahimli@yahoo.com*

*Maye metalların daxilində potensialın Tomas-Fermi psevdopotensialı ilə verildiyini qəbul etməklə müəyyən olunmuşdur ki, dinamik özlülük  $\eta = A \cdot T^{-2} - D$  qanunu ilə təsvir olunur. Göstərilmişdir ki, birinci hədd ion, temperaturdan asılı olmayan ikinci hədd isə elektron alt sistemini xarakterizə edir. Bir neçə maye metalın (Məs: Pb, Sn, Zn) özlülüüyünün hesablanmış qiymətləri ~4% xəta ilə müvafiq təcrübi nəticələrlə uzlaşır.*

**Açar sözlər:** maye metal, özlülük.

Kondensə olunmuş hallar fizikasının elmi və praktiki baxımdan ciddi maraq kəsb edən məsələlərindən biri sürət qradiyenti sahəsində mayelərdə yaranan özlülük hadisəsinin mahiyyətə aşkarlanmasıdır. Lakin çoxsaylı nəzəri və təcrübi tədqiqatların olmasına baxmayaraq, hal-hazırda özlülüyün fiziki mexanizminə dair vahid bir model, yaxud nəzəriyyə mövcud deyil [1-3]. Son deyilən maye aqreqat halının dinamik xaotik quruluşa və statistik yaxın nizamə malik olmasıdır.

Atomar quruluşun qeyd olunan məxsusiyyəti özlülüyün tədqiqində statistik metodları ön plana çəkir. Lakin mayələrə tətbiq baxımından müasir statistik nəzəriyyələr bir sıra çatışmazlığa malikdir. Bu ilk növbədə onunla əlaqədardır ki, hissəciklər arasında mərkəzi və qoşa-additiv qarşılıqlı təsirin mövcudluğuna əsaslanan statistik nəzəriyyə yalnız hipotetik sadə mayeləri öyrənməyə imkan verir [2]. Bu nəzəriyyə real mayələrin fiziki xassələrini, keyfiyyət baxımından belə, tədqiq etmək üçün yararsızdır.

Bu və ya digər nəzəri yanaşmaların təcrübə ilə uyğunluğunu yoxlamaq məqsədilə adətən normal mayələr, ilk növbədə təsirsiz elementlərin, yaxud da qələvi metalların mayeləri götürülür. Nisbi sadəliyinə baxmayaraq deyilən mayelərdə də fiziki mənzərə mikroskopik baxımdan kifayət qədər mürəkkəbdir. Belə ki, məsələn, qələvi metal mayələrində (eləcə də digər metallik mayelərdə) ionlararası qarşılıqlı təsir bütövlükdə kollektiv xarakterli olub bü-

tün ionların və sərbəst elektronların iştirakı ilə baş verir. Sərbəst elektronlar uzaq məsafədə ionlararası kulon itələməsini tamamilə ekranlaşdırır, kiçik məsafələrdə isə ionlararası effektiv cəzətməni təmin edir. İonun xətti ölçüsü tərtibli daha kiçik ionlararası məsafələrdə itələmə qüvvəsi elektron buludları arasında meydana çıxan mübadilə effektləri hesabına yaranır. Göründüyü kimi, maye metallarda hissəciklər arasında qarşılıqlı təsir, bütün hallarda, ionlar və sərbəst elektronların təşkil etdikləri altsistemlərin birgə iştirakı ilə yaranır. Təbiidir ki, maye metalda baş verən fiziki hadisənin təbiətindən asılı olaraq deyilən altsistemlərin hər biri öz əlavəsini verməlidir. Daha böyük məsafələrdə ionlar arasında qoşa-additiv cəzətmə təsir göstərir. Fərz olunur ki, bu cəzətməyə uyğun potensial sönən və ossilyasiya xarakterləridir.

Qeyd edək ki, hal-hazırda heç bir real maye üçün molekullar (ionlar) arasında qarşılıqlı təsiri qanəedici təsvir edən nəzəriyyə mövcud deyil. Hal parametrlərinin dəyişmə intervalından asılı olaraq fərqli ynaşmalar mövcuddur. Xüsusi halda çoxsaylı təcrübələr göstərir ki, ərimə nəticəsində metalların atomar quruluşu və rabitənin xarakteri ciddi dəyişikliyə uğramır. Bu səbəbdən sərbəst elektron nəzəriyyəsi eyni dərəcədə kristallik və maye metallara şamil edilə bilər [4-6]. Biz aşağıdakı şərhimizdə son deyiləni əsas götürəcəyik.

### Özlülüyn fenomenoloji təsviri

Dinamik quruluş və yaxın nizam mayenin yerləşdiyi fiziki şəraitdən asılı olaraq ciddi dəyişdiyindən hal-hazırda hal parametrlərinin geniş dəyişmə diapazonunda özlülüynü mikroskopik baxımdan vahid bir mexanizmlə təsvir etmək, prinsipcə belə, mümkün deyil. Bu səbəbdən çox vaxt müxtəlif modellərdən istifadə olunur.

Hazırkı tədqiqat işində maye metallarda bütün həcm üzrə potensial paylanması ossilyasiya xarakterli psevdopotensialla verildiyini qəbul etməklə bir sıra maye metalların dinamik özlülüynü tədqiq edilir.

Mayelərin özlülüynünün molekullararası cəzətmə hesabına yarandığını fərz edərək Nyuton mayeləri üçün ümumi xarakter daşıyan bir fenomenoloji yaxınlaşmanı nəzərdən keçirək. Bu məqsədlə özlülüyn (η) Nyuton qanunu ilə verildiyini qəbul edək. Onda stasionar sürət qradienti ( $\frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \text{const}$ ) sahəsində bilavasitə qonşu maye laylarının dS kəsiyinə təsir edən daxili sürtünmə qüvvəsi

$$F_s = \eta \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) dS \quad (1)$$

olar. Burada η-dinamik özlülük əmsəlidir. (1)-dən özlülük

$$\eta = F_s \left[ \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) \cdot dS \right]^{-1} \quad (2)$$

olar.

Göründüyü kimi, dinamik özlülük; mahiyyətcə, vahid sürət qradienti sahəsində ( $\frac{\partial \vartheta}{\partial r} = 1$ ) qradientə perpendikulyar götürülmüş vahid səthə (dS=1) təsir edən sürtünmə qüvvəsidir. Təbii ki, bu qüvvə xəyalən götürülmüş dS

səthinə bilavasitə yaxın (səthin əks üzərində yerləşən) iki maye layları arasında təsir göstərən ilişmə qüvvəsidir. Laminar axın zamanı  $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right) = \text{const}$  olduğundan  $\left[\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right) \cdot dS\right]^{-1} = \text{const} = B$  olar və (2)-dən

$$\eta = B \cdot F_s \quad (3)$$

alarıq. Deməli, qərarlanmış laminar axında mayenin dinamik özlülüüyü laylar arasında ilişmə, digər sözlə, molekulyar cəzətmə qüvvəsi ilə düz mütənasibdir. Göründüyü kimi, molekullararası cəzətmə qüvvəsinin analitik ifadəsi məlum olduqda, prinsipcə özlülük əmsalını hesablamaq olar. Bu yaxınlaşmada özlülük molekullararası qarşılıqlı təsir qüvvəsi ilə təyin olunduğundan, o aktivasion proses deyil və laylar arasında impuls daşınması maye hissəciklərinin rəqsi hərəkəti vasitəsilə həyata keçirilir.

### Maye metalların özlülüüyü

Aydındır ki, fenomenoloji yanaşmadan alınan (3) ifadəsi, prinsipcə, bütün mayələrə şamil edilə bilər. Lakin  $F_s$  -in ifadəsi əksər növ mayələr üçün aşkar formada məlum deyil. Nisbətən sadə bir xüsusi halda-maye metallar üçün, laylararası qarşılıqlı təsir qüvvəsinin ifadəsini və nəticə etibarilə özlülüüyü müəyyən edək.

Məlumdur ki, metallik kristallarda müsbət yüklü ionların yaratdıqları elektrostatik xarakterli potensial sahədə sərbəst elektronların hərəkəti aşağıdakı psevdopotensialla xarakterizə olunur [7]:

$$\varphi(r) = \frac{A_1}{r} \cdot e^{-B_1 r} \quad (4)$$

Burada  $A_1$ -ionun təbiətindən (əsasən elektrik yükündən) asılı sabit;  $B_1 = \lambda^{-1}$ -dir. ( $\lambda$ -ekranlaşma radiusudur). Metalda sərbəst elektronların Tomas-Fermi nəzəriyyəsində ekranlaşma radiusu  $\lambda_{T-F}$  praktiki olaraq temperaturdan asılı deyil və sərbəst elektronların konsentrasiyası və metalın 0 K-nə uyğun Fermi enerjisi ilə təyin olunur [6]. (4)-də  $B_1 r < 1$  olduqda  $e^{-B_1 r} \approx 1 - B_1 r + \frac{(B_1 r)^2}{2}$  olduğunu nəzərə alsaq

$$\varphi(r) \approx \frac{A_1}{r} - A_1 B_1 + \frac{A_1 B_1^2}{2} r \quad (5)$$

alarıq. Digər tərəfdən,  $F = -\text{grad } \varphi$  olduğundan laylararası təsir qüvvəsini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$F = -\frac{d\varphi(r)}{dr} = \frac{A_1}{r^2} - \frac{A_1 B_1^2}{2} = \frac{A_1}{r^2} - D_1 \quad (6)$$

Burada  $D_1 = A_1 B_1^2 / 2$  temperaturdan asılı olmayan sabitdir. (6)-nı (3)-də nəzərə aldıqda

$$\eta = B \cdot F = \frac{B A_1}{r^2} - B D_1 = \frac{A_2}{r^2} - D_2 \quad (7)$$

alarıq.

(7)-də  $A_2 = BA_1$  və  $D_2 = BD_1$ -dir. Göründüyü kimi, maye metalların özlülüyü iki həddin cəmi kimi götürülə bilər:

$$\eta = \frac{A_2}{r^2} - D_2 = \eta_I + \eta_{II} \quad (8)$$

Ehtimal etmək olar ki, müsbət yüklü iondan olan məsafənin kvadratı ilə tərs mütənəsb olan birinci  $\eta_I = \frac{A_2}{r^2}$  hədd cəzibmə qüvvəsi hesabına yaranan özlülükdür. İkinci həddin isə  $\eta_{II} = -D_2 = -BD_1$ , mənfi olması və ionlararası məsafədən asılı olmaması onun sərbəst elektron qazı ilə bağlı olmasını fərz etməyə əsas verir. Fenomenoloji (8) münasibəti ümumi meyarlar baxımından da gözləniləndir. Belə ki, maye, metal bir-biri ilə qarşılıqlı təsirdə olan ion və elektron altsistemlərindən ibarət olduğundan aydındır ki, fiziki hadisələrin yaranmasında hər iki altsistem bu və ya digər dərəcədə iştirak edəcək. Özlülüyə gəlincə, hesab edirik ki, birinci hədd- $\eta_I$ , altsistemlərarası (ion-sərbəst elektron) qarşılıqlı təsirlə, ikinci hədd- $\eta_{II}$  isə elektron-elektron qarşılıqlı təsiri ilə bağlıdır. Müsbət yüklü ionlar sərbəst elektronlarla ekranlaşdığından, təbiidir ki, özlülüynün yaranmasında ion-ion qarşılıqlı təsiri praktiki olaraq rol oynamayacaq.

Mayelərin istidən genişlənmə əmsalı tərtibcə uyğun bərk fazanın genişlənmə əmsalı ilə eyni olduğundan qəbul etmək olar ki, mayelərdə atomlararası məsafənin temperatur asılılığı xətti qanunla verilir, yəni  $r \sim T$ -dir. (Xatırlayaq ki, ərimə prosesində metalın həcmi  $2 \div 5\%$  artır). Onda maye metalın özlülüynün temperatur asılılığı (8)-dən

$$\eta(T) \approx \frac{A}{T^2} - D \quad (9)$$

kimi təyin olunur. (9) bizim istifadə etdiyimiz fenomenoloji yanaşmada maye metalların özlülüynün ümumi ifadəsidir. Göründüyü kimi, baxılan halda özlülük ion altsistemi ilə bağlı və temperaturun artması ilə kvadratik qanunauyğunluqla azalan həddən və elektron altsistemi ilə əlaqəli olub temperaturdan asılı olmayan həddin cəmindən ibarətdir. Qeyd edək ki, aşkarlanan (9) qanunauyğunluğu maye metalın növündən asılı olmadığından o, universal xarakter daşmalıdır.

(9) ifadəsindəki A və D kəmiyyətləri məlum olarsa özlülüynün istənilən temperaturda qiyməti hesablanar və beləliklə, özlülüynün temperatur asılılığının aşkar ifadəsi müəyyən edilə bilər. Bu məqsədlə yarım fenomenoloji metoddan istifadə edək. Tutaq ki, iki ixtiyari  $T_i$  və  $T_j$  temperaturlarında özlülük  $\eta_i$  və  $\eta_j$ -dir. (Fərz olunur ki,  $T_j > T_i$ -dir). Onda (9)-dan istifadə etməklə A və D-nin ifadələrini tapmaq və nəhayət olaraq göstərmək olar ki,

$$\eta(T) = \left[ \frac{T_i^2 T_j^2}{T_j^2 - T_i^2} \Delta \eta_{ij} \right] \cdot \frac{1}{T^2} - \left[ \frac{T_j^2}{T_j^2 - T_i^2} \Delta \eta_{ij} - \eta_i \right] \quad (10)$$

Burada  $\Delta \eta_{ij} = (\eta_j - \eta_i)$  götürülən indeksə uyğun temperaturlarda özlülük fərqi.

(10) ixtiyari iki temperaturda maye metalın özlülüynü məlum olduqda

geniş temperatur intervalında  $\eta=\eta(T)$  asılılığını müəyyən etməyə imkan verir.

Yuxarıda şərh etdiyimiz fenomenoloji yanaşma ilk dəfə [8]-də təklif olunmuş və qələvi metal mayələrində yoxlanılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, qələvi metal mayələrinin özlülüyü, (8)-ə müvafiq olaraq, ion və elektron toplananları olmaqla iki hissədən ibarətdir. Özlülüyn (10)-dan hesablanan və cədvəl qiymətləri kifayət qədər qanıedici ( $\leq 4\%$ ) uzlaşır.

Hazırkı işdə qeyri-qələvi metal mayələrinə (9)-un tətbiqi və alınan nəticələr verilir. Tədqiqat obyektii olaraq Zn, Pb, Hg və Sn metallarının mayeləri götürülmüş və geniş temperatur oblastlarında onların dinamik özlülüynü araşdırılmışdır.

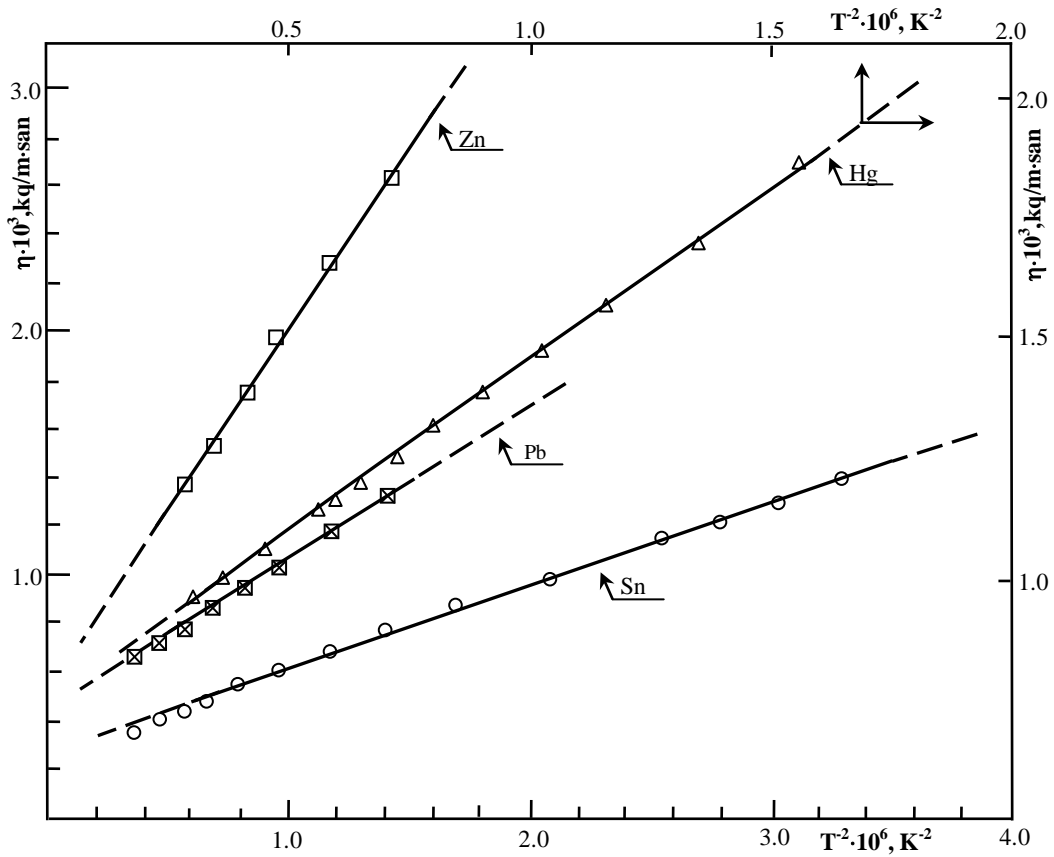
Ədəbiyyatdan hər bir mayenin özlülüynünün iki ixtiyari temperaturdakı qiymətlərindən istifadə etməklə yuxarıda şərh etdiyimiz qaydada A və D kəmiyyətləri hesablanmış və beləliklə, hər üç tədqiq olunan mayenin özlülüynünün aşkar analitik ifadəsi müəyyən edilmişdir. (Özlülüynün təcrübi qiymətləri [8]-dən götürülmüşdür).

Cədvəl

Maye metal	Özlülüynün analitik ifadəsi (kq/m <sup>3</sup> ·sən)-lə	Temperatur intervalı, K
Pb	$\eta = \frac{621}{T^2} - 6,38 \cdot 10^{-4}$	$720 \leq T \leq 1100$
Sn	$\eta = \frac{363}{T^2} - 5,60 \cdot 10^{-4}$	$510 \leq T \leq 1100$
Zn	$\eta = \frac{1500}{T^2} - 2,75 \cdot 10^{-4}$	$720 \leq T \leq 970$
Hg	$\eta = \frac{70}{T^2} - 7,42 \cdot 10^{-4}$	$253 \leq T \leq 573$

Özlülüynün ədəbiyyatdan götürülmüş cədvəl ( $\eta_c$ ) və fenomenolooji yanaşmaya əsasən alınmış (9) ifadəsi vasitəsilə hesablanmış ( $\eta_n$ ) qiymətləri kifayət qədər dəqiqliklə uzlaşır. Özlülüynün tədqiq olunan mayelər üçün  $\eta = \eta\left(\frac{1}{T^2}\right)$  koordinatlarda təsviri şəkil 1-də verilmişdir.

Hər üç maye üçün bu asılılıq, (9)-a müvafiq olaraq, düz xətlidir. Bu, xüsusi halda ona dəlalət edir ki, bərk fazada hansı elektron quruluşuna (qələvi, qeyri-qələvi və s.) malik olmasından asılı olmayaraq bütün maye metalların dinamik özlülüynü (9)-a analoji iki həddli ifadə ilə təyin olunur; birinci – temperaturun kvadratı ilə tərs mütənasib olan hədd, ion altsisteminin, temperaturdan asılı olmayan, ikinci hədd isə sərbəst elektronların yaratdığı elektron altsisteminin özlülüynünü səciyyələndirir. Maye metallar üçün universallığı güman edilən bu qanunauyğunluq, zənnimizcə, bütün maye metallarda həcm üzrə potensialın Tomas-Fermi potensialına bənzər olması ilə bağlıdır.



Şəkil 1. Dinamik özlülüyn temperatur asılılığı.

Metallarda elektron qazı klassik qazdan fərqli olaraq, kvant xarakterlidir – elektronlar bir-biri ilə nisbətən güclü qarşılıqlı təsirdədirlər. Bu səbəbdən metalda elektron qazına “Fermi mayesi”-də deyilir. Qeyd edək ki, Fermi mayesi cırlaşmış sistem olduğundan onun fiziki xassələri temperaturdan asılı deyil.

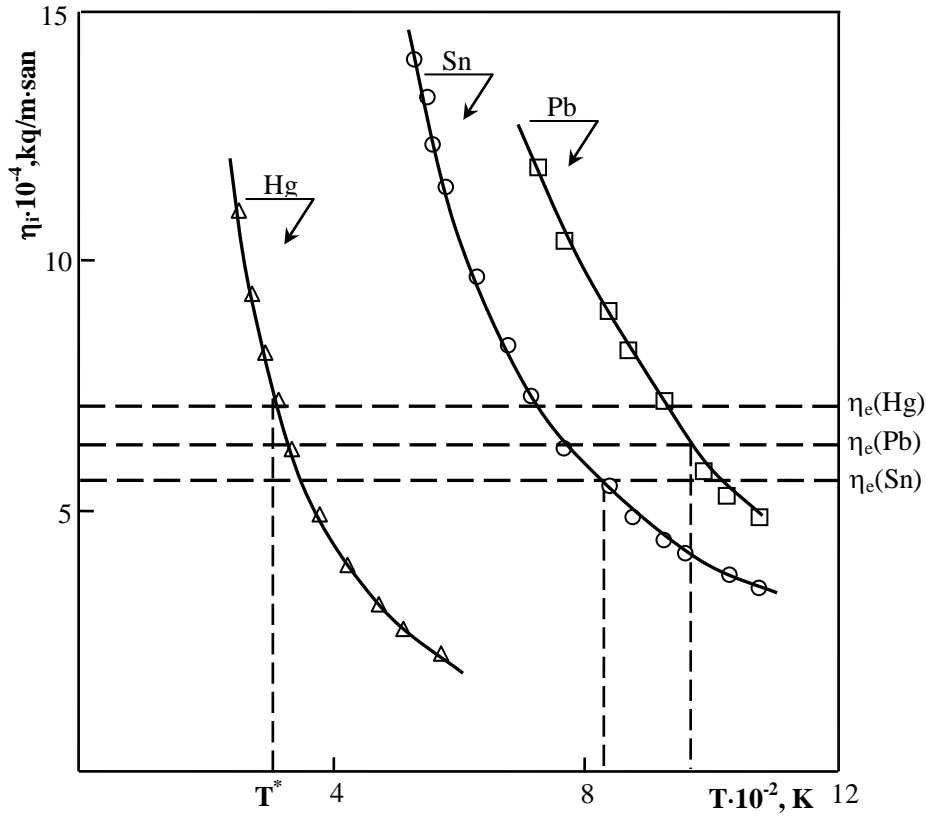
Yuxarıda deyilənlərə əsasən, maye metalı fiziki baxımdan ion və elektron altsistemlərinə uyğun mayelərin qarışığından ibarət məhlul kimi götürmək olar. Ümumilikdə məhlulun komponentlərindən hər biri maye metalın fiziki xassələrinə öz əlavəsini verməlidir. Dinamik özlülüyə tətbiq baxımından son deyilən (8)-də öz əksini tapmışdır: ümumilikdə özlülük ion ( $\eta_I$ ) və elektron ( $\eta_{II}$ ) toplananlarının cəminə bərabərdir. (8) və (9) ifadələrindən istifadə etməklə özlülüyn ion və elektron toplananlarını hesablamaq olar. Müvafiq nəticələr Pb və Sn mayeləri üçün şəkil 2-də verilmişdir. Qrafikdə uyğun mayelərin elektron özlülükləri qırıq-qırıq üfüqi xətlərlə göstərilmişdir. Hər iki maye metalın ion və elektron özlülükləri tərtibcə eynidir. Temperaturun artması ilə ion özlülüynü  $\eta_i \sim T^{-n}$  qanunu üzrə azaldığı halda, elektron özlülüynü temperaturdan asılı deyil. Lakin hər bir maye üçün elə bir  $T^*$  temperaturu

vardır ki, bu temperaturda  $\eta_i = \eta_e$ -olur. (Pb və Sn mayeləri üçün  $T^*$  uyğun olaraq 986 və 805K-dır ). Xarakterik  $T^*$  temperaturundan aşağı temperaturlarda özlülüynün ion,  $T > T^*$  yüksək temperaturlarda isə elektron toplananı üstünlük təşkil edir. Çox ehtimal ki, son deyilənlər  $T < T^*$  temperaturlarda ionlararası qarşılıqlı təsirin intensiv olması və temperaturun artması zamanı zəifləməsi ilə əlaqədardır.

Maye metalları elektron özlülüynü  $\eta_e$  müfəssəl olaraq [10]-da araşdırılmış və göstərilmişdir ki,

$$\eta_e \cong 14,22 \cdot 10^2 \cdot \frac{E_F}{\rho} \quad (11)$$

(11)-də  $E_F$ -erqlərlə ifadə olunmuş Fermi enerjisi,  $\rho$ -maye metalın Om·sm-lə xüsusi müqavimətidir. Hər iki kəmiyyət maye metallarda temperaturdan, praktiki olaraq, asılı olmadığından  $\eta_e \approx \text{const}$  olur.



Şək. 2. Özlülüynün ion ( $\eta_i$ ) və elektron ( $\eta_e$ ) toplananlarının temperatur asılılığı.

Beləliklə, hazırkı tədqiqatda bütün maye metalların özlülüynü üçün yararlı olan yarıempirik analitik ifadə müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki,

maye metalın dinamik özlülüyü temperaturun artması ilə  $\eta_i \sim T^{-2}$  qanununa uyğun azalan ion və temperaturdan asılı olmayan elektron özlülüklerinin cəmindən ibarətdir. İşdə Pb, Sn, Hg və Zn mayeləri üçün özlülüyün toplananları ayrılmış və müqayisəli təhlil edilmişdir. Digər növ mayelərdən fərqli olaraq maye metalların özlülüyünün iki ciddi fərqli hədlərlə verilməsi, hazırkı tədqiqatda, hər bir metal mayesinin, ion və elektron altsistemlərindən təşkil olunmuş özünəməxsus maye məhlul kimi götürülə bilinməsi ilə əlaqələndirilir.

#### ƏDƏBİYYAT

1. Де Бур. Теория жидкого состояния. УФН. 1986, с.127-150.
2. Фишер И.З. Статистическая теория жидкостей. М.,1989, 370 с.
3. Eyvazov E.Ə., Məsimov E.Ə., Quliyeva R.Q. Bakı Universitetinin Xəbərləri, Fiz-riy. ser. №1, 2013, s.98-110.
4. Уббелоде А. Плавление и кристаллическая структура. М., 1979, 460 с.
5. Займан Д.Ж. Физика металлов. М., 1989, 340 с.
6. Харрисон У. Электронная структура и свойства твёрдых тел. Т.2, М.,1983, с.163.
7. Хейне В., Коен М., Уейр Д. Теория псевдопотенциала. М., 1975, 370 с.
8. Eyvazov E.A at ol. Intern. Journal of. Acad. Research. V.2; No 2, 2010, p.175-179.
9. Таблицы физических величин. Справ. под ред. акад. И.К.Кикоина. М.,1976, с.137
10. Eyvazov E.A. Phusica XV. № 1. B.2009, p.58-65

#### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Э.А.ЭЙВАЗОВ, Э.А.МАСИМОВ, А.Б.ИБРАГИМЛИ

#### РЕЗЮМЕ

Установлено общее выражение динамической вязкости жидких металлов, согласно которому вязкость состоит из двух частей: ионной - ( $\eta_i \sim T^{-2}$ ) и электронной ( $\eta_e = const$ ). На примере жидких металлов Sn, Pb, Hg и Zn выявлено удовлетворительное согласие между вычисленными и экспериментальными значениями вязкости. Общность установленной закономерности объясняется универсальностью потенциала Томаса-Ферми для всех жидких металлов.

**Ключевые слова:** жидкий металл, вязкость.

#### FEATURES OF DYNAMIC VISCOSITY OF LIQUID METALS

E.A.EYVAZOV, E.A.MASIMOV, A.B.IBRAHIMLI

#### SUMMARY

The general expression was installed for the dynamic viscosity of liquid metals, whereby the viscosity consists of two parts: ionic ( $\eta_i \sim T^{-2}$ ) and electronic ( $\eta_e \sim const$ ). For example, Sn, Pb, Hg and Zn liquid metals found satisfactory agreement between the calculated and experimental values of viscosity.

The community of the established pattern subjects to the universality of the Thomas-Fermi potential for all liquid metals.

**Keywords:** liquid metal, viscosity.

*Redaksiyaya daxil oldu: 09.10.2014-cü il*  
*Çapa imzalandı : 26.11.2014-cü il*