

**UOT № 541.8****MAYELƏRİN ÖZLÜLÜK MEXANİZMLƏRİ****E.Ə.EYVAZOV\*, E.Ə.MƏSİMOV\*\*, R.Q.QULİYEVA\****\*Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti**\*\*Bakı Dövlət Universiteti**ruhiyye-quliyeva@mail.ru*

*Mayelərin bir sıra mövcud özlülük mexanizmləri araşdırılmış və belə bir qənaətə gəlinmişdir ki, hal parametrlərinin geniş dəyişmə intervalında, özlülük heç də aktivasiya prosesi olmayıb, əsasən nano ölçülü maye təbəqələri arasında fonon mübadiləsi yolu ilə baş verir. Son deyilənlər baxımından çoxsaylı, müxtəlif təbiətli mayelərin özlülükləri hesablanmış və təcrübi nəticələrlə qaneedici uzlaşma olduğu müəyyən edilmişdir.*

**Açar sözlər:** Maye, özlülük, mexanizm;

Maye və bərk maddələrin mikroskopik baxımdan əsas səciyyəvi xüsusiyyətlərindən biri onları təşkil edən hissəciklərin (ion, atom, yaxud da molekul) arasında kifayət qədər güclü cəzəmə xarakterli rabitənin olması və bir-birinə bilavasitə yaxın yerləşməsidir. Lakin deyilən sıx qablaşma mayeyə onun ixtiyarına verilən qabın formasını almağa mane olmur. Bərk maddələr kimi, mayelər də xarici mexaniki təsirlərə yüksək dərəcədə davamlıdır: sıxılmır, hərtərəfli dartılmaya qarşı güclü müqavimət göstərir və s. Göstərilən əlamətlərin maye aqrekat halında mövcudluğu maye hissəciklərinin istilik hərəkətinin requlyar kristallik quruluşun dağılmasına kifayət etdiyi halda, mikroskopik–kiçik, həcmərdə hissəciklərarası rabitənin tam qırılmasına kifayət etməməsi ilə bağlıdır. Rentgenquruluş təhlili göstərir ki, son qeyd olunan səciyyəvilik mayelərdə „yaxın” nizamın yaranmasına gətirir. Başqa sözlə, hər bir maye molekulunun yaxın ətrafında psevdokristallik (yaxın nizam) quruluş mövcuddur. Aydın ki, mayenin quruluşa həssas bütün xassələrində, o cümlədən özlülükdə kvazikristallik quruluş özünü göstərməlidir. Lakin mayelərdə özlülüyn yaranma mexanizmlərinə həsr olunmuş çoxsaylı tədqiqatların olmasına baxmayaraq, onların birgə təhlili qənaətbəxş deyil. Hazırkı tədqiqat son deyilən çatışmazlığı, qismən də olsa, aradan qaldırmaq və özlülüyn təbiətinə dair ilk dəfə [1]-də təklif olunan yarımfenomenoloji yanaşmanın geniş sinif mayelər üçün yararlılığını şərh etmək məqsədi daşıyır.

## Ümumi yanaşma

Əvvəlcə ümumilikdə mayenin axması üçün xarakterik olan ümumi qanunauyğunluğu nəzərdən keçirək. Tutaq ki, mayenin həcmində axım sürəti qeyri-bərabər paylanmışdır, yəni sürət sahəsi mövcuddur. Həcmnin bütün hissələrində sürətin  $z$  oxu boyunca yönəldiyini qəbul etsək, onda  $z$  oxuna perpendikulyar götürülmüş  $dS$  səthinə maye tərəfindən təsir edən daxili sürtünmə qüvvəsi, fenomenoloji baxımdan,

$$F_r = \eta \left( \frac{dv}{dz} \right) dS \quad (1)$$

ifadəsi ilə təyin olunacaq. Burada, vahid sürət qradiyenti sahəsində qradiyentə perpendikulyar seçilmiş vahid səthə təsir edən daxili sürtünmə qüvvəsinə bərabər olan  $\eta$  kəmiyyəti **dinamik özlülük** adlanır. Dinamik özlülük, axım stasionar olduqda, yəni sürət zaman keçdikcə dəyişmədikdə axımın xarakterini təyin edir. Qeyri-stasionar halda isə axımın xarakteri bilavasitə  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  kimi təyin olunan və **kinematik özlülük** adlanan kəmiyyətlə təyin olunur ( $\rho$  - mayenin sıxlığıdır).

Nəzəri araşdırmalar göstərir ki, özlü mayelərin ümumi hərəkət tənliyi aşağıdakı kimidir [2]:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v \right] = -\nabla P + \eta \Delta v + \left( \xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} v \quad (2)$$

burada  $\nabla$  və  $\Delta$ , uyğun olaraq, qradiyent və Laplas operatorlarıdır;  $P$ -təzyiq;  $\xi$  - həcmi özlülük əmsalı,  $t$  isə zamandır. Sıxılmayan ( $\operatorname{div} v = 0$ ) mayelər üçün (2) -dən hərəkət tənliyi

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta v \quad (3)$$

olar.(3) adətən Navye-Stoks tənliyi adlanır. Maye daxilində sürət sahəsinin paylanma xarakterini müəyyən etmək üçün (3)-ü maye-bərk fazaların ayrılma sərhədində sürəti sıfır qəbul etməklə həll etmək lazımdır.

Qeyd edək ki, daxili sürtünmə, yaxud özlülük qüvvəsinin (1) fenomenoloji ifadəsi  $\eta = \text{const}$  şərti daxilində təzyiq və temperaturun fiksə olunmuş qiymətlərində heç də bütün mayelər üçün ödənilmir. Bir çox mayelər, xüsusilə yüksəkmolekullu mayelərin özlülüyü sürət qradiyenti  $\left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)$ -dən asılı olur. Bu

növ mayelər „qeyri-Nyuton mayeləri” adlanır. Bir qayda olaraq, axım şəraitinin dəyişməsi ilə qeyri-nyuton mayələrində müxtəlif xarakterli relaksasiya prosesləri baş verir. Aydınır ki, mayenin növündən, axımın xarakterindən və baş vermə şəraitindən asılı olaraq daxili sürtünmə qüvvəsinin (özlülük qüvvəsinin) yaranması da fərqli mexanizmlə baş verəcək. Biz aşağıda nyuton

mayelərində dinamik özlülüyün bir sıra xarakterik yaranma mexanizmini nəzərdən keçirəcəyik.

### Birkomponentli mayelərin özlülüğü

Mayelərin özlülüğü probleminin bir çox tədqiqatlarda araşdırılmasına baxmayaraq, hələlik vahid bir yanaşma əldə edilməmişdir. Bunun əsas səbəbi özlülüğün mayenin quruluşundan kəskin asılı olmasıdır. Maye aqrekat halı üçün dinamik (xaotiklik və yaxın nizamı özündə birləşdirən) quruluş xarakterik olduğundan və bu dinamiklik geniş intervalda dəyişə bildiyindən, aydındır ki, mayenin özlülüğü də çoxsaylı parametrlərdən asılı olmalıdır. Nəzəri olaraq bütün mümkün parametrləri hərəkət tənliyi (3)-ə daxil etmək mümkün olmadığından özlülüyə həsr olunan nəzəriyyələrin hər biri müəyyən fərziyyələr daxilində yararlıdır.

Özlülüyə həsr olunmuş ilk tədqiqatlardan biri maye molekulunun məxsusi həcmə malik olması, nəhayət etibarilə isə molekullararası sərbəst həcm yaranması ilə əlaqədardır. Adətən bu nəzəriyyə „Özlülüğün sərbəst həcm nəzəriyyəsi” adlanır. Müfəssəl olaraq sərbəst həcm nəzəriyyəsi çoxsaylı monoqrafiyalarda, məs., [3] şərh olunduğundan biz məsələni mahiyyətə nəzərdən keçirərək. Müvafiq nəzəriyyəyə görə „sərbəst həcm” yanaşmasında sadə mayenin özlülüğü

$$\eta = \frac{a}{(V-b)^n} \quad (4)$$

ifadəsi ilə verilir. Burada  $a$ ,  $b$  və  $n$ -götürülən maye üçün sabit kəmiyyətlərdir;  $V$ -molyar həcmdir. Ən sadə halda,  $n=1$  götürüldükdə (4)-dən

$$\eta = \frac{a}{V-b} \quad (5)$$

alarq (5)-ə bəzən **Baçinski düsturu** da deyilir. (5)-i kinematik özlülükə ifadə etsək,

$$\frac{1}{\nu} = \frac{\rho}{\eta} = \frac{M}{a} - \frac{b}{a} \cdot \rho \quad (6)$$

alarq ( $\rho$  -mayenin sıxlığı;  $\nu$  -kinematik özlülük;  $M$  -molekulyar çəkidi).

Tədqiqatlar göstərir ki, (6) ən sadə hesab olunan, normal mayelər üçün belə, qənaətbəxş deyil:  $\left(\frac{1}{\nu}\right) = f(\rho)$  asılılığı bir sıra maye metallar üçün, (məs., Cd, Zn, Al) düz xəttə uyğun olduğu halda, digərləri üçün (məs., Pb, Sn, Si, Hg, Ca, Na, K, Sb) xəttlikdən ciddi fərqlənir [4].

Özlülüğün təzyiqdən asılılığının tədqiqi nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, Baçinski düsturu ümumi halda ödənilmir: sabit həcmdə temperaturun artması zamanı mayenin özlülüğü azalır. Məsələn, həcmi sabit saxlamaqla civənin temperaturunu  $30^\circ C$  -dən  $75^\circ C$  -ə kimi yüksəltəndə özlülük 0,0152-dən

0,0140 puaza kimi azalır [4].

Sərbəst həcm yanaşmasının digər bir çətinliyi mayenin müxtəlif xassələrinin tədqiqindən sərbəst həcm üçün fərqli qiymətlərin alınmasıdır [4].

Son deyilənlər onu göstərir ki, Baçinski düsturu çox da böyük olmayan temperatur intervallarında ödənilir və sadə interpolyasiya münasibəti olub ciddi fiziki mahiyyət daşıyır.

Mayelərin özlülüyünə dair təcrübi nəticələrin araşdırılmasında geniş istifadə olunan yanaşmalardan digəri, ilk dəfə Frenkel və Eyrinq tərəfindən nəzəri olaraq irəli sürülən, "aktivləşmə nəzəriyyəsidir" [5]. Bu nəzəriyyəyə görə, maye daxilində götürülmüş  $1 \text{ sm}^2$  sahəyə sürüşdürücü qüvvə təsir etdikdə molekulun yerləşdiyi potensial çuxurun (manənin) dərinliyi (hündürlüyü) qüvvənin təsir istiqamətində müəyyən qədər kiçilir, əks istiqamətdə isə bir o qədər artır. Son deyilən qonşu maye layları arasında sürət gradientinin və nəhayət, mayenin dinamik özlülüyünün yaranmasına səbəb olur. Göstərmək olar ki, deyilənlər baxımından mayenin dinamik özlülüyü

$$\eta = \frac{hN}{V} e^{\frac{\Delta F}{RT}} \quad (7)$$

ifadəsi ilə təyin olunur [4]. Burada  $h$ -Plank sabiti,  $N$ -  $V$  həcmindəki molekulların sayı,  $R$  – universal qaz sabiti və  $\Delta F$  –özlü axımın sərbəst aktivləşmə enerjisidir. Əgər nəzərə alsaq ki,

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S,$$

onda (7)-dən

$$\eta = \frac{hN}{V} \cdot e^{\frac{\Delta S}{R}} \cdot e^{\frac{\Delta H}{RT}} = B \cdot e^{\frac{\Delta H}{RT}} \quad (8)$$

alarlıq. (8)-də  $\Delta H$  və  $\Delta S$  –maye hissəciyinin əsas haldan aktivləşmə halına keçməsi nəticəsində sistemin entalpiyası və entropiyasının dəyişməsidir. **Nəzəri olaraq (8), ilk dəfə, Frenkel tərəfindən verilmişdir** [7].

Bir çox hallarda biratomlu, təmiz mayelər üçün alınan (8) ifadəsindən maye məhlulların özlülüyünün araşdırılmasında da istifadə edilir. Lakin fiziki baxımdan bunu düzgün hesab etmək olmaz. Doğrudan da, qram-atom həcmi  $V$  olarsa özlülüyün (7) ifadəsində  $\Delta F$  özlü axımın sərbəst aktivləşmə enerjisi olar. Məhlulun komponentlərinin hər birinin „**fərdi sərbəst aktivləşmə enerjisi**” olduğundan, (7)-dəki  $\Delta F$  aydın fiziki məna kəsb etmir. (8)-də eksponent qarşısındakı vuruq hissəciklərin aktivləşməsi nəticəsində axımın entropiyasının dəyişməsindən asılı olduğundan və məhlullar üçün bu kəmiyyət aydın məna kəsb etmədiyindən,  $\Delta F$  -in araşdırılmasındakına bənzər qeyri-müəyyənlik yaranır. Odur ki, (8)-dən maye məhlulların özlülüyünün araşdırılmasında istifadə etmək, fiziki mahiyyət baxımından, müəyyən mənada, məqsədəuyğun hesab edilə bilinməz.

Digər bir anlaşılmazlıq (8)-in əsasında duran (7) ifadəsinin təhlilindən irəli gəlir: belə ki, (7)-dən sərbəst aktivləşmə enerjisi

$$\Delta F = RT \ln\left(\frac{V\eta}{Nh}\right) \text{-dır.} \quad (9)$$

Maye metallar üçün (9)-dan hesablanan  $\Delta F$  temperaturdan asılı olaraq xətti qanun üzrə artır. Bu isə o deməkdir ki, aktivləşmə entropiyası  $\Delta S$  mənfidir, yəni maye hissəcikləri aktivləşmə halına keçdikdə sistemin entropiyası azalır. Mayelərin kvazikristallik quruluşu baxımından bu anlaşılmazdır. **Bütün son deyilənlər mayelərin deşik modelinin kifayət qədər səhih olmadığını göstərir.** (8)-ə əsaslanaraq, demək olar ki, eksponent qarşısındakı B vuruğunun sabitliyi özlü axımın aktivləşmə enerjisinin müvafiq bərk fazanın ərimə temperaturu ilə düz mütənasib olmasına dəlalət edərdi. Təcrübi nəticələrə əsasən belə bir asılılıq əksər maye metallar üçün, müşahidə olunur [6]:

$$\Delta H \cong 3,42T_i \left( \frac{\text{kal}}{q \cdot \text{atom}} \right) \quad (10)$$

Çox da uzun olmayan molekulardan təşkil olunan assosiasiya olunmuş mayelərdə aktivləşmə entropiyası müsbətdir. Zəncir formalı molekulardan təşkil olunmuş mayelərin axımında molekulun bütövlükdə deyil, onun nisbətən kiçik hissələri-seqmentlərinin iştirakı daha ehtimallıdır. Xətti poliefirlərin özlü xassələrinin tədqiqi göstərir ki, aktivləşmə entropiyası zəncirin uzunluğundan xətti asılıdır [6]:

$$\Delta S \cong 6,8 - 0,5z^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

burada, z- zəncirdə atomların orta sayıdır. [11] -ə əsasən deyilən quruluşlu polimerlərin dinamik özlülüüyü

$$\ln \eta = \frac{A}{R} + \frac{B}{R} z^{\frac{1}{2}} + \frac{C}{RT}, \quad (12)$$

ifadəsi ilə verilə bilər. Burada A, B və C götürülən homoloji sıra üçün sabit kəmiyyətlərdir. Müəyyən olunmuşdur ki, zəncirvari molekulaların axıcılığı üçün zənciri təşkil edən seqmentlər öz aralarında „razılaşdırılmış” (birgə) hərəkət etməlidir, yəni seqmentlərin normal rəqslərdə olduğuna oxşar hərəkətləri baş verməlidir. Bu isə, öz növbəsində fonon qazının yaranmasına gətirməlidir.

Mayelərin özlülüününün yuxarıda nəzərdən keçirdiyimiz mexanizmlərdən fərqli mexanizmi Endreyd tərəfindən irəli sürülmüşdür [8]. Bu yanaşmada fərz olunur ki, maye axımı zamanı müxtəlif sürətli qonşu təbəqələr arasında **impuls daşınması bu təbəqələrdə yerləşən hissəciklərin rəqsi hərəkətləri yolu ilə baş verir.** Endreyd sadə bircins mayenin dinamik özlülüüyünü ərimə temperaturuna bilavasitə yaxın temperaturda nəzərdən keçirmişdir. Mahiyyətə Endreyd modeli aşağıdakından ibarətdir: Tutaq ki, mayenin axım sürəti istiqamətinə paralel yerləşən, bilavasitə qonşu iki atomar təbəqə nəzərdən keçirilir. Əgər  $1\text{sm}^3$  həcmdəki atomların sayı n olarsa, onda götürülən təbəqənin  $1\text{sm}^2$  sahəsinə  $n^{2/3}$  qədər atom düşər ki, onların da  $\frac{1}{3}$  hissəsi seçilən atomar təbəqəyə perpendikulyar istiqamətdə rəqs edəcək. Təbəqələr arasında impuls ötürülmə-

sinin atomların rəqs amplitudlarının maksimum olması zamanı baş verdiyini qəbul etsək,  $1\text{sm}^2$  səthdə yerləşən atomların hər bir meyletmə aktında qonşu təbəqəyə verdiyi impuls  $\sim mn^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{dv}{dy}$  olar. ( $m$ - atomun kütləsi;  $n^{-\frac{1}{3}}$ -təbəqələr-arası orta məsafə;  $y$ -təbəqəyə perpendikulyar istiqamətdə götürülən koordinat;  $\frac{dv}{dy}$ -təbəqəyə toxunan (tangensial) istiqamətdə maye axımının sürət qradientidir). Aydındır ki, 1 san-də baş verən bu növ impulsötürmə aktlarının sayı  $\sim \frac{1}{3}v \cdot n^{\frac{2}{3}}$  olar. ( $v$  – rəqs tezliyidir). Nəticə etibarilə 1 san-də  $1\text{sm}^2$  səthdən ötürülən yekun impuls, yəni özlü qüvvə

$$\sum F = \frac{dP}{dt} \cong \frac{4}{3}v \cdot m \cdot n^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (13)$$

olar. (13 -də „4” vuruğu bir periodda atomun atomar təbəqəni dörd dəfə „kəşib keçməsi” ilə əlaqədar daxil edilmişdir). (13)-dən,

$$\eta \cong \frac{4}{3}v \cdot m \cdot n^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Göründüyü kimi, rəqs modelində mayenin dinamik özlülüyü atomun kütləsindən (müəyyən mənada, mayenin növündən), vahid həcmdəki atomların sayından və atomun rəqs tezliyindən asılıdır. Ərimə temperaturuna bilavasitə yaxın temperatur nəzərdən keçirildiyindən, təbiidir ki, rəqs tezliyini məlum Lindeman düsturu [9] ilə vermək olur, yəni

$$v = c \left( \frac{T_l}{A \cdot V^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

olduğunu qəbul etmək olar. (15)-də  $A$ - atom çəkisi;  $V$ -molyar həcm,  $T_l$ -ərimə temperaturu,  $c$ -sabit kəmiyyətdir. (15)-i (14)-də nəzərə alsaq, ərimə temperaturunda mayenin dinamik özlülüyü

$$\eta(T_l) \cong a(A \cdot T_l)^{\frac{1}{2}} \cdot V^{-\frac{2}{3}} \quad (16)$$

olar. BS sistemində  $a = 5,1 \cdot 10^{-9}$  -dur. Bir sıra sadə mayelərin (maye metalların) dinamik özlülüyünün təcrübədən alınan  $\eta_t$  və (16)-dan hesablanan ( $\eta_h$ ) qiymətləri cədvəl 1-də verilmişdir.

**Biratomlu mayelərin özlülüyünün ərimə temperaturuna müvafiq təcrübi  
( $\eta_t$ ) və (16)-dan hesablanmış ( $\eta_h$ ) qiymətləri**

Maye metal	$\eta_t, 10^{-3}$ puaz	$\eta_h, 10^{-3}$ puaz	$\eta_h^*, 10^{-3}$ puaz	$\left(\frac{\eta_h}{\eta_t}\right)$
Li	6,02	6,04	-	1,00
Na	6,95	6,69	4,59	1,04
K	5,37	5,36	4,33	1,00
Rb	6,74	6,66	-	1,01
Cs	6,86	7,06	-	0,97
Ag	38,5	44,4	29,2	0,87
Au	53,8	51,5	50,4	1,04

Cədvəldə verilən müqayisə göstərir ki, sadə-biratomlu mayelər üçün ərimə temperaturuna yaxın temperaturlarda **rəqs modeli** təcrübə ilə kifayət dərəcədə uzlaşır, yəni real fiziki mənzərəni düzgün əks etdirir. Aydınır ki, mayelərdə atomların (yaxud digər quruluş elementinin) tezlik spektrinin analitik ifadəsi məlum olarsa, (14) vasitəsilə dinamik özlülüyü geniş temperatur intervalında hesablamaq olar. Hazırda deyilən tezlik spektri məlum olmadığından, rəqs modelin geniş temperatur intervalında təcrübi nəticələrlə müqayisəsini aparmaq mümkün deyil. Bununla belə, özlülüyün rəqs modelinin real fiziki mənzərəyə yaxınlığını bir sıra dəlillər də sübut edir. Onlardan, misal olaraq, kristallar üçün təklif olunan məlum Debay modelinin mayelərə tətbiq olunmasını göstərmək olar. Digər sözlə, fərz etmək olar ki, ərimə temperaturunda özlülük

$$\eta(T_t) \cong 3,85 \cdot 10^{-6} \frac{A \cdot \theta_D}{V^{\frac{1}{3}}}, \text{ puaz}; \quad (17)$$

ifadəsi ilə təyin olunur [4].

( $\theta_D$  - Debay temperaturudur). Müxtəlif maye metalların dinamik özlülüklərinin,  $\theta_D$  -ya uyğun, (17)-dən hesablanmış qiyməti ( $\eta_h^*$ ) təcrübi qiymətlərlə kafi dərəcədə uzlaşır, bu isə rəqslərlə impuls ötürülməsinin, bütövlükdə real mənzərəni düzgün əks etdirməsini bir daha sübut edir.

Özlülüyün digər bir mexanizmi Pancenkov tərəfindən təklif olunmuşdur [10]. Bu mexanizmin əsasında təbəqələrarası impuls daşınmasında yalnız enerjinin müəyyən minimal qiymətindən ( $\varepsilon$ ) kiçik enerjili molekulların (atomların) iştirak etməsi fərziyyəsi durur. Bununla yanaşı, [10]-da fərz olunur ki, impuls mübadiləsi yalnız və yalnız tarazlıq halına uyğun məsafədən böyük məsafədə yerləşən molekullar arasında baş verir. Pancenkova görə impulsun ötürülmə mexanizminin fiziki mənzərəsi laylardan molekulların müvəqqəti qoparaq (assosiasiya edərək) qarşdakı laya impuls ötürməsi və sonradan ilkin

yerləşdiyi laya qayıtməsindən ibarətdir. Deyilənlər çərçivəsində, [10]-a əsasən, özlülük

$$\eta = 3\sqrt{6}R \left( \frac{b^2}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\rho^{\frac{4}{3}}}{M^{\frac{5}{6}}} T^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{\varepsilon}{RT}} \left( 1 - e^{-\frac{\varepsilon}{RT}} \right)^2. \quad (18)$$

Burada, R-universal qaz sabiti; M-molekulyar çəki;  $\rho$  -mayenin sıxlığı; b-1 qr-moldakı molekulların məxsusi həcmidir. (18)-i təcrübi nəticələrlə müqayisəsi məqsədi ilə, heç bir fiziki əsas göstərilmədən, [10]-da qəbul edilir ki, impuls daşınması üçün zəruri olan minimal enerji ( $\varepsilon$ ) mayenin buxarlanma istiliyinin ( $E_b$ ) müəyyən hissəsini təşkil edir:

$$\varepsilon \approx \frac{2E_b}{z} \quad (19)$$

(z- koordinasiya ədədidir). (19)-u (18)-də nəzərə almaqla Pancenkov düsturunu təcrübi nəticələrlə müqayisə etmək mümkündür. Deyilən müqayisə göstərir ki, (18)-də  $\varepsilon$  -nin qiymətini seçməklə təcrübə ilə uyğunlaşan qiymət almaq olur. Bu isə Pancenkov modelinin qeyri-adekvat olduğunu göstərir.

### Uyğun hallar nəzəriyyəsinin özlülüyə tətbiqi

Mayelərin xassələrinin tədqiqində uyğun hallar qanunundan geniş istifadə olunur. Bu məqsədlə, adətən, gətirilmiş özlülüyn loqarifminin  $\left( \frac{T_l}{T} \right)$ -dən ası-

lılıq qrafiki, yəni  $\ln \frac{\eta}{\eta(T_l)} = f\left( \frac{T}{T_l} \right)$  funksional asılılıq əyrisi nəzərdən keçirilir

( $T_l$  -ərimə temperaturudur) . Deyilən araşdırma qələvi maye metallar - maye Sn, Hg, Bi və Ca üçün [11]-də aparılmış və müəyyən olunmuşdur ki, müvafiq təcrübi nöqtələr iki düz xətt üzərində - qələvi metallar üçün meyli  $\sim 1,3$ -ə bərabər olan, digər metallar üçün isə  $\sim 2,3$  meylli düz xətt üzərində yerləşir. Bu isə müxtəlif təbiətli sadə mayelərin özlülüynünün fərqli qanunlarla verilməsi zərurəti yaradır.

Digər bir tədqiqatda - [12]-də, uyğun hallar metodu ilə göstərilmişdir ki, ümumilikdə, mayenin özlülüynü

$$\eta = A^{\frac{1}{2}} \frac{P_b^{\frac{2}{3}}}{R^{\frac{1}{6}} \cdot T_b^{\frac{1}{6}}} f\left( \pi, \tau, \frac{c_v}{R} \right), \quad (20)$$

ifadəsi ilə verilə bilər. Burada  $T_b$ ,  $P_b$  böhran temperaturu və böhran təzyiqi; A-

atom çəkisi;  $\pi = \left(\frac{P}{P_b}\right)$ ;  $\tau = \left(\frac{T}{T_b}\right)$ ;  $c_v$  -istilik tutumu; f-göstərilən arqument-

lərdən asılı olan universal funksiyadır. (20) ifadəsi yalnız atomlararası qarşılıqlı təsiri xarakterizə edən potensial əyriləri eyni formaya malik olan mayelər üçün ödənilir.

Uyğun hallar yanaşmasının mayelərə tətbiqi ilə əlaqədar [13, 14]-də irəli sürülən fərziyə fiziki baxımdan ciddi maraq kəsb edir. Bu fərziyəyə görə oxşar atomar quruluşa (oxşar radial paylanma əyrisinə) və eyni böhran temperaturuna malik olan mayelər izoözlü olmalıdırlar, yəni istənilən temperaturda onların özlülüyü bir-birinə bərabər olmalıdır. Lakin hələlik son deyilən öz təcrübə təsdiqini tapmamışdır.

Mayelərin statistik-mexanika nəzəriyyəsinə uyğun hallar təsəvvürlərini tətbiq etməklə Capmen [15] göstərmişdir ki, mayelərin özlülüyü, ümumən,

$$\eta = a \cdot \frac{\pi \cdot n^2 \cdot d}{u^*} \int_0^{\infty} \frac{dU(r)}{dr} [1 - R(r)] r^3 dr \quad , \quad (21)$$

ifadəsi ilə verilə bilər. Burada n-vahid həcmdəki atomların sayı; d-atomun

diametri;  $u^* = \left(\frac{3kT}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$  -atomun istilik sürəti; m-atomun kütləsi;  $U(r)$  iki maye

hissəciyinin qarşılıqlı təsir potensialı; r-bu hissəciklər arasındakı məsafə; a -sabit kəmiyyət və  $R(r)$ -radial paylanma funksiyasıdır.

Əgər  $U(r)$  yalnız məsafədən ( $d$ ) və energetik parametrlər  $\varepsilon$  -dən asılı olarsa, onda aşağıdakı kimi təyin olunan adsız  $\eta^*$  və  $T^*$  parametrlərini daxil etməklə (21)-i bu parametrlərə görə yazmaq olar [15] :

$$\eta^* = \eta d^2 N / (ART)^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (22)$$

$$T^* = kT / \varepsilon \quad , \quad V^* = 1 / nd^3 \quad ,$$

burada, N-Avoqadro ədədi; A-atom çəkisi; R -universal qaz sabitidir. [15]-ə əsasən (22) adsız parametrləri vasitəsilə (21) aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$\eta^*(V^*)^2 = G(T^*) \quad . \quad (23)$$

Göründüyü kimi, özlülük yalnız  $V^*$  və  $T^*$  adsız parametrlərin funksiyasıdır.

Universal  $G(T^*)$  funksiyası isə

$$G(T^*) = \frac{c}{T^*} \int_0^{\infty} x^3 \frac{d}{dx} \left[ \frac{U(x)}{\varepsilon} \right] [1 - R(x, T^*)] dx \quad , \quad (24)$$

ifadəsi ilə verilir [15]. Burada  $x = \frac{r}{d}$ ; c-sabit kəmiyyətdir. Adsız parametrlərə

görə (23) ifadəsi maye metalların özlülüyünün temperatur asılılığını keyfiyyətə düzgün təsvir edir və energetik parametrlər ( $\varepsilon$ ) maye metallar üçün ərimə temperaturu ( $T_l$ ) ilə

$$\varepsilon \cong 5,2T_l \frac{kal}{q \cdot atom} \quad (25)$$

kimi bağlıdır [15]. Bir neçə metallar üçün  $\varepsilon$  -in qiyməti cədvəl 2-də verilmişdir.

Cədvəl 2 [15]

Metal	Li	Na	K	Rb	Cs	Ag	Au	Al	Fe
$d, \text{Å}$	3,14	3,84	4,76	5,04	5,40	2,88	2,88	2,86	2,52
$\frac{\varepsilon}{k}, 10^3 K$	2,35	1,97	1,76	1,60	1,55	6,40	6,75	4,25	10,9

Mahiyətcə  $\varepsilon$  parametri atomlararası qarşılıqlı təsiri xarakterizə edən potensial əyrinin OK-ya müvafiq minimumu tərtibliyidir. Lakin digər müxtəlif təcrübi və nəzəri metodlarla  $\varepsilon$  -nin alınan qiyməti cədvəl 2-də verilənlərdən xeyli fərqlənir. Bu isə o deməkdir ki, maye metalların özlülüyünə dair şərh etdiyimiz uyğun hallar nəzəriyyəsi dürüst hesab edilməməlidir.

Yuxarıda nəzərdən keçirdiyimiz və digər mövcud özlülük mexanizmlərinin hər biri istər tədqiqat obyektlərinin müxtəlifliyi və istərsə də hal parametrlərinin (ilk növbədə, temperatur və təzyiqin) dəyişmə intervalına görə məhdud xarakter daşıyır, bir çox hallarda isə təcrübi nəticələrlə uzlaşmır. Bu səbəbdən çox vaxt fenomenoloji yaxınlaşmalardan istifadə edilir. Onlardan biri ilk dəfə [1]-də təklif olunmuşdur və mahiyətcə aşağıdakından ibarətdir.

### Özlülüğün fenomenoloji təsviri

Tutaq ki, bircins maye Nyuton mayesidir, yəni sürət qradienti koordinatdan və zamandan asılı deyil. Onda bilavasitə qonşu laylararası meydana çıxan daxili sürtünmə qüvvəsi  $F_r = \eta(dv/dr)dS$  olduğundan, stasionar axım halında dinamik özlülük

$$\eta = F_r \left[ \left( \frac{dv}{dr} \right) \cdot dS \right]^{-1} \quad (26)$$

olar. Göründüyü kimi, dinamik özlülük vahid sürət qradienti sahəsində qradientə perpendikulyar götürülmüş vahid səthə təsir edən sürtünmə qüvvəsidir. Təbiidir ki, bu qüvvə xəyalən seçilmiş  $dS$  səthinə bilavasitə yaxın-səthin əks üzvlərində yerləşən, iki maye layları arasında təsir göstərən ilişmə qüvvəsidir. Laminar axım zamanı  $\left( \frac{\partial v}{\partial r} \right) = const$  olduğundan,  $\left( \frac{\partial v}{\partial r} \cdot dS \right)^{-1} = B$  işarələməsi etməklə, (26)-dan

$$\eta = B \cdot F_r \quad (27)$$

alar. Ümumilikdə, potensial sahədə enerji ilə qüvvə  $U(r) = -\int F(r)dr$  kimi əlaqədə olduğundan, (27)-ni

$$\eta = -B \cdot \frac{dU(r)}{dr} \quad (28)$$

kimi də yazıla bilər. (28) özlülüyün ümumi ifadəsi olub, maye hissəcikləriarası qarşılıqlı təsir potensialı  $U(r)$  məlum olduqda özlülüyün aşkar analitik ifadəsini müəyyən etməyə imkan verir. Lakin  $U(r)$  potensialı mayenin növündən – ilk növbədə onu təşkil edən hissəciklərin təbiətindən, asılı olduğundan aydındır ki, bütün mayələr üçün eyni dərəcədə yararlı olan vahid qanunauyğunluq axtarmaq, prinsipcə belə, düzgün deyil. Lakin çoxsaylı tədqiqatlar (məs., [16, 17]) göstərir ki, əksər bərk cisimlər əridikdə molekullararası məsafə  $\sim(8 \div 10)\%$  artır, molekullararası qarşılıqlı təsir qüvvəsi isə xarakter etibarilə bərk aqrekat halında olduğuna bənzər qalır. Bu səbəbdən bərk faza üçün məlum olan  $U(r)$  potensialı müvafiq mayələr üçün də yararlıdır. Mayələrdə yaxın nizamın varlığını qəbul etməklə, son deyilənlər baxımından, (28)-in köməyiylə mayenin özlülüyünü araşdırmaq olar. Qeyd edək ki, **deyilən halda nanometr qalınlıqlı bilavasitə qonşu laylar arasında impuls daşınması bu laylarda yerləşən hissəciklərin rəqsi hərəkəti yolu ilə, yəni fononlar vasitəsilə baş verir.** Pancenkov [10] modelindən fərqli olaraq, [1]-də təklif olunan modeldə maye hissəciklərinin assosiasiyası tələb olunmur.

(28)-ə əsaslanaraq çoxsaylı maye karbohidrogenlər və ion rabitəli mayələrin özlülüyü geniş temperatur intervalında hesablanmış və müvafiq təcrübi nəticələrlə müqayisəli təhlil edilmişdir [19, 21]. Bütün hallarda göstərilmişdir ki, dinamik özlülük temperaturun artması ilə üstlü qanunla azalır:

$$\eta(T) = \frac{A}{T^n} \quad (29)$$

(29)-da  $A$  və  $n$  mayenin təbiətindən asılı olan sabitlərdir. (Bu sabitlər özlülüyün iki ixtiyari təcrübi qiymətinə görə tapılır [19]).

Bir sıra ion rabitəli mayələr üçün özlülüyün (29)-un köməyiylə müəyyən edilmiş aşkar ifadəsi cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 3

Ərinti	Ərimə temperaturu $T_l$ (K) [22]	Ərimə istiliyi, $\Delta H \cdot 10^{-3}, \frac{\text{coul}}{\text{mol}}$ [22]	Temperatur intervalı, K	Özlülüyün analitik ifadəsi ( $\eta_h$ ), $\frac{kq}{m \cdot \text{san}}$ [19]
NaCl	1073	28,80	1098 ≤ T ≤ 1273	$2,28 \cdot 10^{12} T^{-5}$
NaOH	592	6,36	623 ≤ T ≤ 823	$3,244 \cdot 10^7 T^{-3,55}$
KOH	683	7,50	673 ≤ T ≤ 873	$11,030 \cdot 10^8 T^{-4,43}$
KNO <sub>3</sub>	611	9,62	623 ≤ T ≤ 813	$3,110 \cdot 10^{12} T^{-3,24}$
LiNO <sub>3</sub>	523	25,5	530 ≤ T ≤ 700	$7,780 \cdot 10^7 T^{-3,70}$
AgJ	830	9,91	878 ≤ T ≤ 1100	$2,164 \cdot 10^5 T^{-2,67}$
AgBr	703	9,16	882 ≤ T ≤ 1076	$2,310 \cdot 10^4 T^{-2,41}$

Bütün tədqiq olunan mayelərin cədvəldə verilən uyğun analitik ifadələrlə hesablanmış qiymətləri kifayət qədər dəqiqliklə ( $\leq 1-2\%$ ) təcrübə qiymətlərlə uzlaşır. Misal olaraq deyilən müqayisə NaCl ərintisi üçün cədvəl 4-də verilmişdir.

NaCl ərintisinin özlülüyünün (29)-a uyğun hesablanmış ( $\eta_h$ ) və cədvəl ( $\eta_c$ ) qiymətləri  $\left(\frac{kq}{m \cdot \text{san}}\right)$  –lə [19].

Cədvəl 4

Kəmiyyət	Temperatur, K							
	1098	1123	1148	1173	1198	1223	1248	1273
$\eta_c \cdot 10^6$	1432	1275	1138	1017	912	820	752	704
$\eta_h \cdot 10^6$	1428,6	1276,5	1143,4	1026,7	928,9	833,3	753,1	682
$\eta_h / \eta_c$	0,997	1,0008	1,004	1,009	1,018	1,016	1,001	0,969

İon rabitəli mayelərin dinamik özlülüyünə dair cədvəl 3 və 4-də gətirilənlərdən göründüyü kimi, özlülüyün nano təbəqələr arasında fonon mübadiləsi ilə baş verməsinə əsaslanaraq [1]-də müəyyən olunan (29) üstlü qanunu reallığı kifayət qədər düzgün əks etdirir. Müxtəlif təbiətli çoxsaylı mayelərin dinamik özlülüyünün geniş temperatur intervalında tədqiqi də son deyilənləri təsdiq edir [20].

Beləliklə, hazırkı işdə mayelərin dinamik özlülüyünün bir sıra əsas mexanizmləri keyfiyyət baxımından araşdırılmış və müxtəlif təbiətli mayelər üçün geniş temperatur intervalında eyni dərəcədə yararlı hesab edilə biləcək mikroskopik mexanizmin olmaması qənaətinə gəlinmişdir. Fikrimizcə bunun əsas səbəbi konseptual baxımdan özlülüyün təbiətinə korrekt yanaşmamaqla bağlıdır. Hesab edirik ki, özlülük maye hissəciklərinin aktivləşmə və sonradan difuziyası yolu ilə deyil, çox ehtimal ki, əsasən rəqsi mexanizmlə, yəni nanolay-lararasında fonon mübadiləsi ilə baş verir.

#### ƏDƏBİYYAT

1. Eyvazov E.A at ol. Intern.Journal of Acad.research. VI, №2, B., 2010, p.217-224.
2. Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1971, 428с.
3. Резибуа, Пьер, Де Ленер. Классическая теория жидкостей и газов М.: Мир, 1980, 497 с.
4. Белашенко Д.К. Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970, 400 с.
5. Крокстон. Клив А. Физика жидкого состояния. М.: Мир, 1978, 400 с.
6. Глесстон С. и др. Теория абсолютных скоростей реакции М.: Мир, 1992, 395 с.
7. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. М.: Наука, 1975, 592 с.
8. Andrade E.N. Phil. Mag. 17. 1497, 1939, p. 123-128.
9. Уббелоде А. Расплавленное состояние вещества. М.: Мир, 1989, 520 с.
10. Панченков Г.М. Теория вязкости жидкостей. М.: Наука. 1947, 215 с.
11. Соловьев А.Н. Атомная энергия, 3, 550. 1957, с. 218-223.

12. Вуколович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968, 507 с.
13. Голик А.З. Докл. АН. СССР. 125, 396. 1959, с.323-326.
14. Chumaevskii N.A., Rodnikova M. N. J. Mol. Liquid S.31. 2002, p.127-131.
15. Charpen T.W. Amer. Inst. Chet. Eng. Journal, 12, 395. 1966, p. 241-245.
16. Уббелоде А. Плавления и кристаллическая структура . М.: Мир, 1979, 460 с.
17. Eyvazov E.Ə. Bərk cisimlər fizikası . Bakı: Təhsil, 2003, 450 s.
18. Каплан И. Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Мир, 1982, 297 с.
19. Eyvazov E.Ə. və b. Müxtəlif potensiallı mayelərin dinamik özlülüyü. Pedaqoji Universitetin xəbərləri. Bakı, №1. 2010, s.195-202.
20. Eyvazov E.Ə. və b. Metallar fizikanın müasir. problem. Beynəlxalq konf. mat-rı. Bakı, 2010, s.65-67.
21. Eyvazov E.Ə. və b. Molekulyar fizika və termod-ya giriş. Bakı: Çinar-çap, 2010, 602 s.
22. Таблицы физических величин. Справ. под ред. акад. И.К.Кикоина М.: Наука, 1976, 1016 с.

## **МЕХАНИЗМЫ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ**

**Э.А.ЭЙВАЗОВ, Э.А.МАСИМОВ, Р.Г.КУЛИЕВА**

### **РЕЗЮМЕ**

На основе анализа соответствующих литератур заключено, что доминирующим механизмом в возникновении вязкости жидкостей является фононный обмен между ближайшими нано слоями в поле градиента скорости. Получено аналитическое выражение для динамической вязкости и установлено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** жидкость, вязкость, механизм.

## **THE VISCOSITY MECHANISMS OF LIQUIDS**

**E.A.EYVAZOV, E.A.MASIMOV, R.G.GULIYEVA**

### **SUMMARY**

The mechanisms of viscous liquids were investigated. It was concluded that in a wide range of state parameters between the nano-size liquid layers the viscosity takes place by phonon exchange. In terms of phonon mechanism the viscosity of a large number of liquids with different nature was calculated and satisfactory agreement of experimental results has been established .

**Key words:** liquids, viscosity, mechanism.

*Redaksiyaya daxil oldu: 18.02.2013-cü il*  
*Çapa imzalandı: 06.03.2013-cü il*