

УДК 539:621

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-125-131

## **ЩОДО БУДОВИ РОЗПЛАВІВ ЕВТЕКТИЧНИХ СИСТЕМ: ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ОПИСУ СТРУКТУРИ РІДИНИ**

*І.Р.Михайлюк, Т.О. Ваврик, О.С. Царева\*, Н. Д. Подубинська*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342)723824; e-mail: pta@iung.edu.ua*

**Анотація.** У запропонованій статті систематизовано теоретичні дослідження евтектичних систем, виокремлено зв'язок результатів цих досліджень із модельним представленням опису структури рідини з метою подальшої практичної реалізації. Дане дослідження є актуальним, оскільки не існує узагальненої і систематизованої інформації щодо вивчення структури розплавів евтектичних систем. З одного боку, це пояснюється певними протиріччями деяких досліджень. Проте основною проблемою видається неоднозначність і несистемність інтерпретації результатів досліджень структури розплавів. Авторами зазначено, що при вирішенні задач, пов'язаних з природою рідкого стану, особливий інтерес представляють саме дослідження будови двокомпонентних розплавів, які утворюють в твердому стані діаграми фазової рівноваги евтектичного типу. Поняття евтектика означає "найбільш легкоплавкий" і використовується, щоб описати ізотермічну оборотну реакцію, в якій рідина розпадається на дві і більше тверді фази під час охолодження. Запропоновано здійснювати судження про структуру металічних розплавів евтектичних систем по виду лінії ліквідусу діаграми фазової рівноваги. Для цього всі евтектичні системи підрозділені на: системи з гладкою лінією ліквідусу без точки перегину ні в доевтектичній, ні в заевтектичній області (NI); системи з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідусу; системи з точкою перегину на обох гілках лінії ліквідусу; системи з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонентів і точкою перегину на лінії ліквідусу (0% SI). На основі узагальнених і систематизованих результатів теоретичних і експериментальних досліджень доведено, що евтектичні системи є полігенними системами, які володіють широким діапазоном взаємодії між частинками і, відповідно, мають будову ближнього порядку. Ця інформація може дати можливість однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення опису структури рідини (розплаву).

**Ключові слова:** евтектика; модельне представлення; опис структури рідини; евтектична система, розплав;

### **Аннотація**

В предложенной статье систематизированы теоретические исследования эвтектических систем, выделена связь этих результатов с модельным представлением описания структуры жидкости для дальнейшей практической реализации. Данное исследование является актуальным, поскольку не существует обобщенной и систематизированной информации об изучении структуры расплавов эвтектических систем. С одной стороны, это объясняется наличием противоречий в некоторых исследованиях. Но основной проблемой остается неоднозначность и бессистемность в интерпретации результатов исследования структуры расплавов. Авторами отмечено, что при решении задач, связанных с природой жидкого состояния, особенный интерес представляют именно исследования строения двухкомпонентных расплавов, которые создают в твердом состоянии диаграммы фазового равновесия эвтектического типа. Понятие «эвтектика» означает «наиболее легкоплавящийся» и используется, чтобы описать изотермическую оборотную реакцию, в которой жидкость распадается на две и более твердых фазу во время охлаждения. Предложено делать суждения о структуре металлических расплавов эвтектических систем по виду линии ликвидусу диаграммы фазового равновесия. Для этого все эвтектические системы разделены на: системы с гладкой линией ликвидусу без точки перегиба ни в доэвтектической, ни в заэвтектической области (NI); системы с точкой перегиба на одной ветке линии ликвидусу; системы с точкой перегиба на обеих ветках линии ликвидусу; системы с эвтектической точкой возле нулевой концентрации одного из компонентов и точкой перегиба на линии ликвидусу (0% SI). На основе обобщенных и систематизированных результатов теоретических и экспериментальных исследований доказано, что эвтектические системы являются полигенными системами, владеющими широким диапазоном взаимодействия между частичками и, соответственно, имеющие строение ближнего порядка. Эта информация может дать возможность

однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення описання структури рідкої фази (расплава)

**Ключевые слова:** евтектика, модельное представление, описание структуры жидкости, евтектическая система, рас плав.

**Annotation.** In the offered article theoretical researches of eutectic systems are systematized, connection of results of these researches with model representation of the description of structure of a liquid for the purpose of the further practical realization is allocated. This study is relevant because there is no generalized and systematic information on the study of the structure of melts of eutectic systems. On the one hand, this is due to certain contradictions in some studies. However, the main problem is the ambiguity and inconsistency of interpretation of the results of studies of the structure of melts. The authors note that in solving problems related to the nature of the liquid state, of particular interest is the study of the structure of two-component melts, which form in the solid state phase equilibrium diagrams of the eutectic type. The term eutectic means "most fusible" and is used to describe an isothermal reversible reaction in which a liquid decomposes into two or more solid phases during cooling. It is proposed to make judgments about the structure of metal melts of eutectic systems according to the type of liquidus line of the phase equilibrium diagram. To do this, all eutectic systems are divided into: systems with a smooth liquidus line without an inflection point in either the pre-eutectic or the supereutectic region (NI); systems with an inflection point on one branch of the liquidus line; systems with an inflection point on both branches of the liquidus line; systems with a eutectic point near the zero concentration of one of the components and an inflection point on the liquidus line (0% SI). Based on the generalized and systematized results of theoretical and experimental studies, it is proved that eutectic systems are polygenic systems that have a wide range of interactions between particles and, accordingly, have a short-range structure. This information can make it possible to unambiguously interpret the results of diffraction studies and physicochemical analysis data to create a model representation of the description of the structure of the liquid (melt).

**Keywords:** eutectic, model representation, description of liquid structure, eutectic system, melt.

**Вступ.** Значна частина речовин, які використовуються в промисловості формуються з рідкого стану, а це означає, що в рідині закладена та інформація, яка з часом дасть можливість, керувати процесами кристалізації, отримати матеріали з наперед заданими властивостями.

Поняття евтектика означає "найбільш легкоплавкий" і використовується, щоб описати ізотермічну оборотну реакцію, в якій рідина розпадається на дві і більше тверді фази під час охолодження.

#### **Аналіз сучасних досліджень і публікацій**

У процесі дослідження автори в більшості випадків опиралися на класичну літературу та дослідження, пов'язані з темою розвідки, аналізуючи при цьому їх сучасну інтерпретацію.

Так, у роботах В.І. Данилова [1] показано, що рентгенограми зняті з розплавів ряду евтектик (Bi-Pb, Pb-Sn, Zn-Sn) являють собою суперпозицію рентгенограм обох компонентів. На основі цього зроблено висновок, що поблизу точки кристалізації повного змішування компонентів не відбувається і розплав складається із областей, збагачених тим чи іншим компонентом. Таку систему можна

розглядати як мікрогетерогенну з різними фазовими границями. [1].

Висновки про квазіевтектичну будову рідких евтектик були підтверджені подальшими дослідженнями цілого ряду системи методами рентгеноструктурного аналізу [2-3], електронграфією [4], нейтрографією, вивченням характеру температурної залежності електропровідності, в'язкості, термодинамічних властивостей, а також досвідами по центрифугування рідких евтектик [5], а також дослідженнями по центрифугуванню рідких евтектик [6], дослідженнями Г.М. Бартенєва [7] по теплотах плавлення і теплоємностях евтектики і чистих металів. В даних дослідженнях встановлено, що процес змішування рідких компонентів являється енергетично не вигідним і, очевидно, він не може йти до кінця, а середній розмір мікрообластей, збагачених одним із компонентів, складає величину порядку  $10^3$ - $10^4$  атомів.

В роботах [8-9] заперечується уявлення про евтектиках як про мікрогетерогенній системі і доводиться, що величини мікрообластей, збагачених одним із компонентів, дуже малі (одна – дві координаційні сфери), що до них

може бути застосована звичайна статистична теорія рідин. Що стосується характерної структури твердої евтектики, то вона зумовлена, не тим, що в рідині є вже готова квазіевтектична суміш, а особливими умовами кристалізації рідин в евтектичній точці. Рентгенографічні дослідження деяких евтектичних розплавів підтвердили дану точку зору про будову рідких евтектик. Згідно [10] структура ближнього порядку в рідких евтектиках Bi-Pb, Bi-In, Cd-Sn і Ga-Sn описується статистичною моделлю.

Згідно третьої точки зору рідка евтектика являється хімічною сполукою, який розпадається при кристалізації. Але ця точка зору недостатньо обґрунтована [11]. До того ж термодинамічні дослідження Бартенєва показали, що теплота плавлення евтектики є сума теплот плавлення відповідних фаз, що свідчить проти представлення про евтектику як про хімічну сполуку.

#### Виділення частини невирішеної проблеми

Слід відзначити, що не існує узагальненої і систематизованої інформації щодо вивчення структури розплавів евтектичних систем. З одного боку, це пояснюється певними протиріччями деяких досліджень. Проте основною проблемою видається неоднозначність і несистемність інтерпретації результатів досліджень структури розплавів.

#### Мета досліджень

Мета роботи – Систематизувати теоретичні дослідження евтектичних систем, виокремити зв'язок результатів цих досліджень із модельним представленням опису структури рідини з метою подальшої практичної реалізації.

#### Висвітлення основного матеріалу

При вирішенні задач, пов'язаних з природою рідкого стану, особливий інтерес представляють дослідження будови двокомпонентних розплавів, які утворюють в твердому стані діаграми фазової рівноваги евтектичного типу. В процесі дослідження даних розплавів було запропоновано три точки зору про будову самої рідкої евтектики [11].

У подвійній фазовій діаграмі (рис. 1),  $C_E$  – це склад евтектики, яка формується між компонентами А і В. Приклад, що найчастіше приводиться для ідеалізованої евтектичної мікроструктури – це пластини твердих розчинів

а і  $\beta$ , що чергуються. Така структура може утворитися, якщо матеріал евтектичного складу кристалізується в умовах близьких до рівноважних. Пластинчаті структури формуються під час сумісного або кооперативного росту, оскільки дві фази одночасно ростуть з розплаву. Під час сумісного або кооперативного росту, а фаза відтісняє атоми В, а  $\beta$  фаза відтісняє атоми А. Для будь-якої специфічної швидкості росту, встановлюються поперечні концентраційні градієнти в розплаві на фронті кристалізації, які забезпечують дифузію двох видів атомів, які, в свою чергу, стабілізують встановлену міжфазову відстань. Під час неконтрольованої нерівноважної кристалізації евтектики, можуть бути сформовані різні типи мікроструктур. Одна або обидві первинні фази, можуть бути присутніми додатково до очікуваної пластинчастої структури. При неспрямованій кристалізації, фазове вирівнювання обмежується, як правило, малими розмірами індивідуальних (евтектичних) зерен. Регулярна евтектична структура з однією орієнтацією утворюється тільки при великих значеннях відношення довжина/діаметр  $\gg 1$ , які формуються під час спрямованої кристалізації.

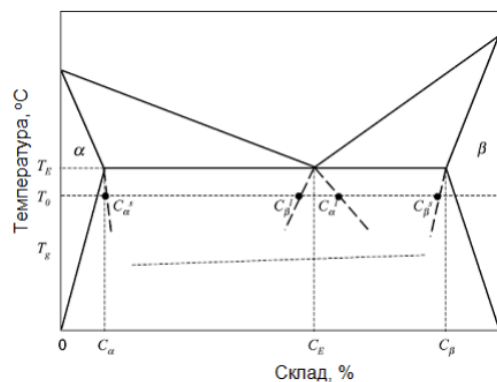


Рисунок 1 – Схематична фазова діаграма простого подвійного сплаву з евтектикою [9]

В.М. Глазов і А.А. Вертман зробили спробу обґрунтувати будову рідких евтектик на основі квазіхімічного наближення на основі аналізу сил міжмолекулярної взаємодії. Було доказано, що хімічна мікронеоднорідність будови рідких евтектик може мати місце в тому випадку, коли сили взаємодії між однойменними атомами

будуть більшими, ніж між різнойменними, тобто:

$$|U_{A-B}| \ll \frac{1}{2}(|U_{A-A}| + |U_{B-B}|)$$

Останнє співвідношення являється умовою позитивності енергії зміщення.

В більшості простих евтектичних системах енергія зміщення позитивна і в їх структурі необхідно очікувати розвитку мікронеоднорідність.

$$\text{При } |U_{A-B}| \ll \frac{1}{2}(|U_{A-A}| + |U_{B-B}|)$$

мікронеоднорідність в розплаві повинна бути відсутньою. У випадку, коли взаємодія між різнойменними атомами значно більша, ніж між однойменними, в розплаві можливі утворення хімічних сполук.

Однак співвідношення між енергіями зв'язку  $U_{A-A}, U_{B-B}$  і  $U_{A-B}$  не завжди можуть пояснити структуру розплавів. Це пояснюється тим, що не враховується вплив опору з'єднаних атомів на парні взаємодії і нехтується вкладом електронного газу в енергію системи. Остання для металічних розплавів може бути значною і не може бути розбита на доданки відносно до парних взаємодій.

Нами зроблена пропозиція про можливість судження про структуру металічних розплавів евтектичних систем по виду лінії ліквідус діаграми фазової рівноваги. Для цього всі евтектичні системи підрозділені на :

1) системи з гладкою лінією ліквідус без точки перегину ні в доевтектичній, ні в заевтектичній області (NI);

2) системи з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідус;

3) системи з точкою перегину на обох гілках лінії ліквідус;

4) системи з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонентів і точкою перегину на лінії ліквідус (0% SI).

Термодинамічні дані по системах з точкою перегину на лінії ліквідус вказують на тенденцію до не змішуваності компонентів. Можливо, що сама точка перегину на лінії ліквідус відповідає сплаву з максимальною трудностю змішування двох рідких компонент і в цих розплавах повинна бути найбільш виражена мікронеоднорідність їх будови. Найбільший ефект, якщо запропонована модель

вірна, повинна бути в евтектичних системах з точками перегину на обох гілках лінії ліквідус. Однак, як показали рентгенографічні випромінювання розплавів системи Au-Ge, Ag-Ge, Ag-Si, Au-Si [5], які належать до даного типу, атоми різних сортів в розплавах евтектичного складу розподілені хаотично, що корелює з енергією зміщення, яка для даних сплавів від'ємна.

Розплави інших концентрацій даних системи можуть мати іншу структуру або характеризуватися полі структурністю. Так, в роботі [10] на основі аналізу ізотерм в'язкості розплавів Ag-Ge, Ag-Si, Au-Ge зроблений висновок про існування вище лінії ліквідус в цих системах сполук відповідно  $Ag_3Ge$ ,  $Ag_5Si$ ,  $Au_2Ge$ , які розпадаються при звичайних швидкостях охолодження і можуть бути зафіксовані в твердому стані при швидкості охолодження  $10^6 - 10^8$  град./с. Дослідження розсіювання нейтронів на малі кути рідкими сплавами Ag-Ge підтверджують, що в даних розплавах взаємодія різносортих атомів грає ведучу роль і приводить до утворення ланцюгів атомів (агломератів).

Дослідження розплавів евтектичних систем з гладкими лініями ліквідус показують, що при температурних, незначно перевищуючих температуру плавлення, вони характеризуються мікрогетерогенною будовою. Так, методами рентгеноструктурного аналізу, дифракцією нейтронів, швидким охолодженням, показано, що структури розплавів Al-Si до евтектичної і евтектичної концентраціями Si подібні і відрізняються і відрізняються від структури розплавів з заевтектичної концентрації Si. В евтектичному розплаві існують області з статистичним розподілом атомів і області із структурою чистих компонент. В евтектичних розплавах всі атоми Al з частиною атомів кремнію утворюють мікрообласті зі статистичним розподілом атомів, інша частина атомів Si утворює гетеро фазні комплекси виду  $Si_4$ . Переважним оточенням односортих атомів характеризується структура ближнього порядку розплавів Al-Sn, Bi-Sn, Cd-Sn, більш складна структура ближнього порядку розплавів системи Cd-In.

Аналіз ізотерм питомого електроопору показує наявність в розплавах при 15 і 75 ат% Cd особливих станів. Із термодинамічних

досліджень [11] зроблений висновок, що в даних розплавах приблизно при 75 ат% Cd утворюються комплекси. Оцінка відносної долі областей взаємного упорядкування показує, що при 500<sup>0</sup> С вона складає 0,3 від повного об'єму, а при 700<sup>0</sup> С ≈ 0,03.

Існують протиріччя в результатах досліджень будови розплавів заевтектичних систем з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідус. Прямі дослідження розплавів цих систем (Ag-Tl, Al-Ge, Al-Sn, Au-Co, Cd-Tl, Ga-In, Pb-Sn, Sn-Zn) показують досить виражене квазіевтектичний розподіл атомів компонент. Квазіевтектична структура ближнього порядку в розплавах системи Ga-In була підтверджена і вивчена в залежності від коефіцієнта дифузії [10]. Однак в ряді робіт на основі вивчення структурно чутливих властивостей робляться висновки про інше розподілом атомів компонент в цих системах. Так, в роботі [10] по виду ізотерми в'язкості системи Al-Ge віднесена, за класифікацією Н.С. Курнакова до ірраціональних систем, тобто до систем з хімічним складом. Цьому складу приписується формула Al<sub>2</sub>Ge. Про переважаючу взаємодію різносторонніх атомів свідчать і дослідження електроопору. В роботі [11] по результатам вимірювання поверхневого натягу зроблено припущення про утворення сполук або груп різницевих атомів, можливо евтектичного складу, в розплавах Pb-Sn. Не виключається можливість утворення сполук при 60 ат% Sn в розплавах Ga-Zn, але інші дослідження говорять про статичний розподіл атомів в даних розплавах.

У роботі [12] на базі розплаву евтектичного складу системи Pb-Sn оцінено межі мікронеоднорідної стабільності в евтектичних розплавах. Дослідження інших, схожих систем показали, що температурні інтервали виявлених аномалій свідчать про те, що в евтектичних системах максимум температури на спінодалі може суттєво перевищувати значення  $2T_{eut}$ .

Досліджені властивості свідчать, що евтектичний розплав є мікрогетерогенним і схожим на монотектичний [9-12]. Однак початок кристалізації в евтектиках не дає змоги чітко спостерігати тенденцію до поділу фаз у рідкому стані. Тому за температур, що суттєво перевищують критичні, розплави є макроскопічно гомогенними, а всі наявні

неоднорідності описуються пуассонівськими флуктуаціями концентрації з малою довжиною фазової когерентності. При цьому однаково важливу роль відіграють як електронно-іонні взаємодії, що стабілізують систему проти поділу фаз, так і електрон-електронні взаємодії, наявністю яких зумовлене екранування електростатичних сил у системі. При зниженні температури ця макроскопічна гомогенність деякий час зберігається, але під час наближення до критичної області об'ємна доля мікронеоднорідностей з різною концентрацією компонентів починає зростати. Односортні взаємодії починають переважати. Реакція електронної підсистеми на температурні зміни є швидшою за реакцію йонної, що виявляється в концентраційній зміні радіуса екранування. Утворена просторова неоднорідність електронного газу є причиною нестабільності в системі і сприяє розвитку флуктуацій концентрацій у білякритичній області. Як наслідок, виникають мікроскопічні кластери, які зростають під час наближення до температури розшарування. В евтектичних системах, що розглядаються, як окремий випадок систем з обмеженою розчинністю компонентів, розміри частин однієї з фаз, змінюючись за зміни температури, не досягають таких розмірів, як у монотектичних системах, тобто їхня седиментаційна стійкість зберігається до температури початкової кристалізації.

Різноманітність структури ближнього порядку характерно і для розплавів систем з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонент. Узагальнюючи результати рентгеноструктурних досліджень і експериментальні результати по електроопору, зроблено висновок про статичне розподілу атомів різних сортів в розплавах гелій-олово. Складне багато структурний розподіл атомів різних структур в розплавах Ge-In, Ge-Pb, Ge-Sn, розплави Ge-In, відносяться допоміжної моделі між квазіевтектичним і хаотичним розподілом атомів, а розплави Ge-Sn – з більшою ймовірністю можна описати на основі моделі хаотичного розподілу атомів різних сортів. Результати експериментів по розсіюванню нейтронів дали можливість зробити висновок, що в розплавах Ві-Cu частина атомів міді розподілена хаотично, а атоми Ві, друга частина – утворюють кластери.

Об'ємна доля кластерів, складається тільки із атомів міді, залежить від складу розплавів і змінюється від 10% до 25%.

Дослідження більш складних евтектичних систем, де компонентами евтектики являються хімічні сполуки, тверді розчини, показали, що в цих випадках в рідині можлива своєрідна квазіевтектична структура із структурними компонентами хімічних сполук, розчинів, а не елементів системи. Таку будову мають евтектичні розплави Bi-In, In-Sb, Tl-Te, Co-Ge, Li-Pb і т.д. присутність асоціанів у ближній координації виявлена і в дослідженнях фізико-хімічних властивостей розплавів систем Ag-Mg, Al-Sb, Cd-Sb, In-Sb, Mg-Bi, Mg-Sn, Ga-Na і т.д. з евтектичними точками на лінії ліквідус. Дані асоціани в одних випадках термодинамічно нестійкі і дисоціюють при температурах, незначно перевищуючи температуру плавлення, в інших випадках вони зберігаються при достатньо високих температурах.

#### Висновок

Узагальнивши вищесказане, можемо стверджувати, що евтектичні системи є полігенними системами, які володіють широким діапазоном взаємодії між частинками і, відповідно, мають будову ближнього порядку. Ця інформація може дати можливість однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення опису структури рідини (розплаву).

#### Література

1. Данилов В.И. Строение и кристаллическая жидкость, К., 1956 р. 568 с.
2. Лобода П.І., Богомол Ю.І., Єрмоленко Д.Ю. Механізм зміцнення спрямовано армованого евтектичного сплаву LaB6-ZrB2 в широкому інтервалі температур. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 2. С. 45–53.
3. Скришевский А.Ф. Рентгенография жидкостей. К., 1966, с.123
4. Дутчак Я.И. Рентгенография жидких металов. Львів: Вища школа, 1977, с.162
5. Louzguine – Luzgin D., Inoue A., Yavari A. R., Vaughan G. Thermal expansion of a glassy alloy studied using a real – space pair distribution

function. *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 23 - 26.

6. Bilyk R., Liudkevych U., MudryS. Structure and short range order of liquid gallium. *Physico - Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2017. V. 25. P. 7- 13. 81.

7. Бартенев Г.М. О строении жидких евтектических сплавов. ИМЕТ АН СССР, 1959 с.93

8. Верман А.А., Самарин А.М., Якобсон А.М. О строении жидких евтектик. *Металлургия и тепло*, 1960, №3, С. 17.

9. Абрикосов Н.Х., Глаголева Н.Н., Чижевская С.Н. Исследование расплавов евтектических систем. *Неорганическая химия*. Т.5, №12, АН. СССР, 1969р.

10. Курнаков Н.С. Избранные труды. т. 1, М.: Издательство АН СССР, 1960

11. Яценко С.П., Кононенко В.И. Особенности изменения вязкости і электросопротивления бінарних системах различного типа. *Фізика і химия*. 1969, т.43. №1. С 89-94.

12. Дутчак Я.И., Френчко В.С., Зайкин В.М., Кузнецова Л.С. О характере атомного упорядочения в рас плавах системы Zn-Sn. *Фізика і химия*. 1980, т.25. №3. С-514-515.

#### References

1. Danylov V.Y. Stroenye y krystalicheskaia zhydkost, K., 1956 r. 568 s.
2. Loboda P.I., Bohomol Yu.I., Yermolenko D.Iu. Mekhanizm zmitsnennia spriamovano armovanoho evtektichnoho splavu LaB6-ZrB2 v shyrokomu intervali temperatur. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. 2011. № 2. S. 45–53.
3. Skryshevskiy A.F. Renthonohrafiya zhydkostei. K., 1966, s.123
4. Dutchak Ya.Y. Renthonohrafiya zhydkykh metalov. Lviv: Vyshcha shkola, 1977, s.162
5. Louzguine – Luzgin D., Inoue A., Yavari A. R., Vaughan G. Thermal expansion of a glassy alloy studied using a real – space pair distribution function. *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 23 - 26.
6. Bilyk R., Liudkevych U., MudryS. Structure and short range order of liquid gallium. *Physico - Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2017. V. 25. P. 7- 13. 81.

7 Bartieniev H.M. O stroenyy zhydkykh evtekticheskykh splavov. YMET AN SSSR, 1959 s.93

8 Verman A.A., Samaryn A.M., Yakobson A.M. O stroenyy zhydkykh evtektik. Metallurhiya y teplo, 1960, №3, S. 17.

9. Abrykosov N.Kh., Hlaholeva N.N., Chyzhevskaya S.N. Yssledovanye rosplavov evtekticheskykh system. Neorhanycheskaya khymiya. T.5, №12, AN. SSSR, 1969r.

10 Kurnakov N.S. Yzbrannyye trudy. t. 1, M.: Yzdatelstvo AN SSSR, 1960

11 Yatsenko S.P., Kononenko V.Y. Osobennosti yzmeneniya viazkosti i elektrosoprotivleniya binarnykh systemakh razlychnogo typu. Fyzyka y khymiya. 1969, t.43. №1. S 89-94.

12 Dutchak Ya.Y., Frenchko V.S., Zaikyn V.M., Kuznetsova L.S. O kharaktere atomnoho uporiadocheniya v ras plavakh systemy Zn-Sn. Fyzyka y khymiya. 1980, t.25. №3. S-514-515.