

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM
VAZIRLIGI**

**ALISHER NAVOIY NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

Qo'lyozma huquqida

UDK: 538.63.

ABDURAXMONOV ASLIDDIN MURTOZAYEVICHNING

**”Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemasidagi birikmalarning magnit xossalarini
yuqori tempraturalarda o’rganish”**

Mutaxassislik: 5A140202–“Fizika (yo’nalishlar bo’yicha)”

MAGISTR

AKADEMIK DARAJASINI OLIH UCHUN YOZILGAN

D I S S E R T A T S I Y A

Ilmiy rahbar: dots. X.O.Shakarov

Samarqand – 2014

Mundarija

KIRISH.....	4
--------------------	----------

I BOB. ADABIYOTLAR SHARHI

1.1 Kamyob Yer metallarining(KEM) elektron tuzilishi.....	8
1.2 Er-NM (NM=Al,Cu,In)sistemalarining holat diagrammasi.....	12
1.3 KEM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.....	16
1.4 KEMdagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi.....	20
1.5 KEMning nomagnit metallar bilan birikmalarining yuqoro temperaturalardagi magnit xossalari.....	22
1.6 Tadqiqot muammosining qo'yilishi.....	25
I bobga doir xulosalar.....	26

II BOB. TADQIQOT USULI VA QURILMASI

2.1 Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash usuli.....	27
2.2 Yuqori temperaturalarda magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash qurilmasining tuzilishi va ish prinsipi.....	30
2.3 Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash xatoliklari.....	39
II bobga doir xulosalar.....	40

III BOB. TADQIQOT NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI

3.1. Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemasidagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligini yuqori temperaturalarda o'lchash natijalari va ularning muhokamasi.....	49
3.1.1. Er-Al sistemi	41
3.1.2. Er-Cu sistemi.....	44
3.1.3. Er-In sistemi.....	46
3.2. Er-(Al,Cu,In) sistemi birikmalarining asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash.....	50
3.3. Er-(Al,Cu,In) sistemasida amal qiluvchi almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usilda o'rganish.....	55
III bobga doir xulosalar.....	59
XULOSALAR.....	60
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	61

KIRISH

Mavzuning asoslanishi va dolzarbligi. Bugungi kunda kamyob Yer metallari(KEM) va ular asosidagi birikmalarning fizik xossalarini shu jumladan magnit xossalarini o'rganishga bo'lgan qiziqish ularning elektron tuzilishining o'ziga xosligi va amalda keng qo'llanilishi bilan bevosita bog'liqdir. Bu ob'ektlarda kechikib to'ladigan 4f – elektron qobiqning mavjud bo'lishi, ularning kinetik, optik, magnit va boshqa fizikaviy, kimyoviy xossalarining o'ziga xosligini aniqlaydi. Ulardan doimiy magnitlar, transformator va drossellarning o'zaklari tayyorlashda, axborotlarni yozishda va qayta eshittirish texnikasining xotirlash qismlari sifatida hamda boshqa o'ziga xos magnit xossalari yangi magnit materiallari yaratishda keng qo'llaniladi. Bu ob'ektlarning fizik xossalarini o'rganish ilmiy jihatdan ham ahamiyatlidir. Chunki, bu ob'ektlardagi almashinuv o'zaro ta'sir tabiati hali to'la aniqlanmagan. Ularning o'ziga xos magnit xossalarini 4f - elektronlar bilan bog'lab tushuntiradigan yangi nazariy modellar yaratildi [1 - 4] va yaratilishi zarur.

Ilmiy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan bu masalani hal etish uchun ularning elektron, kristall va magnit tuzilishi haqida to'la ma'lumotga ega bo'lish kerak bo'ladi. Hozirgi kunda mavjud bo'lgan bunday ma'lumotlar yetarli emas. Ayniqsa, KEMning nomagnit metallar bilan birikmalarning magnit xossalari haqidagi ma'lumotlar ularning magnit tartiblangan holati uchun yetarli darajada bo'la turib, magnit tartibsiz-paramagnit holati uchun, ya'ni qattiq va suyuq holatlarini qamraydigan yuqori temperaturalardagi ma'lumotlar bugungi kundagi adabiyotlarda kam uchraydi. Bu yuqori temperaturalarda magnit o'lchashlar tajribasini o'tkazishning qiyinchiliklari va olingan natijalarni talqin qiladigan tugal nazariyaning hali yo'qligi bilan bog'liqdir.

Ma'lumki, kechikib to'ladigan elektron qobiqli, shu jumladan 4f-qobiqlimateriallarning magnit xossalari (qabul qiluvchanligi) shu qobiqning elektronlar bilan to'lish xususiyatlarini va bu elektronlarning kristall panjara tugunlarida o'troqlashish (lokallashish) darajasini bevosita o'zida aks ettiradi. Bundan tashqari, magnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'lanishi [χ (T)]

bu matriallarning kristall panjarasida yuz beradigan strukturaviy, allotropik va magnit fazoviy o'tishlarni ham sezadigan fizik xossa hisoblanadi.

Tadqiqotning ob'ekti- Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalarida hosil bo'ladigan birikmalar.

Tadqiqotning predmeti- Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi intermetalik birikmalarning magnit qabul qiluvchaligi va ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir hisoblanadi.

Tadqiqot usuli- magnit qabul qiluvchanlikni o'lchashning Faradey usuli va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganishning yarim empirik usuli.

Tadqiqotning maqsadi- Erbiy va uning NM (NM=Al,Cu,In)lar bilan hosil qiladigan birikmalarining magnit xossalarini ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan yuqori temperaturalar sohasida o'lchash va ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish.

Tadqiqotning vazifalari- qo'yilgan maqsadni amalga oshirish uchun quyidagi ishlarni bajarish hisoblandi:

1. Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalarni sintez qilish;
2. Bu birikmalarning magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishlarini $\chi(T)$ ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan yuqori temperaturalar oralig'ida o'lchash va o'lchash natijalarini nazariy jihatdan tushuntirish;
3. O'rganilayotgan namunalarning $\chi^{-1}(T)$ tajribaviy bog'lanishlaridan foydalanib, ularning asosiy magnit xarakteristikalarini – paramagnit Kyuri temperaturasi (θ_p), Kyuri–Veyss doimiysi (C) va bitta Er atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentni (μ_{eff}) aniqlash;
4. Tajribaviy paramagnet Kyuri temperaturalari qiymatidan foydalanib o'rganilgan namunalarda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir parametrini yarim

empirik usulda hisoblash;

5. O'lchash va hisoblash natijalarini chuqur tahlil qilib tegishli xulosalar chiqarish.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi. Bu magistrlik dissertatsiyasida birinchi marta Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi intermetallik birikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishini, ularning qattiq va suyuq holatini qamraydigan, yuqori temperaturalarda tajribada o'lchandi va o'lchash natijalaridan foydalanib ularning asosiy magnit xarakteristikalarini (θ_p, C, μ_{eff}) aniqlandi hamda namunalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlari yarim empirik usulda o'rganildi.

Tadqiqotning nazariy va amaliy ahamiyati. Ushbu dissertatsiyada olingan natijalar KEMning nomagnit metallar bilan hosil qiladigan birikmalarning paramagnit holati va ularda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalarini yuqori temperaturalarda takomillashtirishga va ulardan yangi magnit materiallari yaratishga xizmat qiladi.

Himoya qilinadi: 1. Er va uning Al,Cu,In metallari bilan birikmalarining $\chi(T)$ bog'lanishini ularning qattiq va suyuq holatida o'lchash natijalari va o'lchash natijalarini tushuntirish;

2. Er-(Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalarning tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan foydalanib aniqlangan ularning asosiy paramagnit xarakteristikalarini (θ_p, C, μ_{eff}) hisoblash natijalari. 3. Er-(Al,Cu,In) sistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlarini yari empirik usulda hisplash natijalari.

Ishning tuzilishi va hajmi. Malakaviy bitiruv ishi kirish, uchta bob, xulosalar va 38 ta nomdagi adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan bo'lib, 64 bet lotin alifbosida, bosma shaklda bayon qilingan. Uning mazmuni 12 ta rasm va 5 ta jadval yordamida ko'rgazmali bayon qilingan.

Ishning qisqacha mazmuni:

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslangan; tadqiqot ob'ekti, predmeti va usuli, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ilmiy yangiligi, nazariy va amaliy ahamiyati va ishning tuzulishi va hajmi bayon qilingan.

Birinchi bobda dissertatsiya mavzusiga oid, bugungi kunda ilmiy adabiyotlarda mavjud bo'lgan nazariy va tajribaviy ishlarga (KEMning elektron tuzilishi, Er-NM(NM=Al,Cu,In) sistemalarining holat diagrammasi, KEM uchun paramagnetizmning Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari hamda Er-NM(NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi namunalarning magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari) sharh berilgan. Bobning oxirida tegishli xulosalar qilingan.

Ikkinchi bobda tadqiqot ob'ektlarining magnit xossalarini, ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan, yuqori temperaturalarda o'lchash usuli va qurilmasi batafsil bayon qilingan; o'lchash xatoligi asoslangan.

Uchinchi bobda NM(NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi namunalarning χ (T) bog'lanishini ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan, yuqori temperaturalar oralig'ida (20-1700°C) o'lchash natijalari bayon qilingan, tahlil qilingan va nazariy jihatdan tushuntirilgan. O'lchash natijalaridan foydalanib tadqiqot ob'ektlarining asosiy magnit xarakteristiklari- paramagnit Kyuri temperaturasi- θ_p , Kyuti-Veyss doimiysi-C va bitta Er atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment- μ_{eff} , aniqlangan.

Namunalarning paramagnit Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirning parametrlari hisoblangan. Hisoblash natijalari tushuntirilagan.

O'lchash va hisoblash natijalari tegishli jadvallar va grafiklar ko'rinishida ko'rgazmali tarzda rasmiylashtirilgan. Bob oxirida tegishli xulosalar qilingan.

I.BOB. ADABIYOTLAR SHARHI

1.1. Kamyob Yer metallarining(KEM) elektron tuzilishi.

Kechikib toʻladigan elektron qobigʻlarga (3d,4d,5d,6d,4f,5f) egaboʻlgan atomlardan tashkil topgan metallar oʻtkazuvchan metallar nomi bilan ataladi. KEM ga, 4f-elektron qobigʻi kechikib toʻladigan, lantandan ($z=57$) boshlab lyutetsiygacha ($z=71$) boʻlgan, lantanoyidlar ham deb ataladigan elementlar kiradi.

KEM atomlarida elektronlarning qobiqlar boʻyicha joylashishi, 4f,5d va 6s-qobiqlarni hisobga olmaganda, xuddi ksenon atomidagidek boʻladi. KEM atomlarida 4f-gacha boʻlgan ichki qobiqlar elektronlar bilan toʻlgan boʻlib, ular quyidagi elektron konfiguratsiyaga egadir: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10}$; tashqi electron qobiqlar esa, quyidagi elektron konfiguratsiyasi ega: $4f^n 5s^2 5p^6 5d^{0-1} 6s^2$ [1-4]. Bundagi n-4f qobiqdagi elektronlar soni boʻlib, $n=0$ (La) dan $n=14$ (Lu) gacha oʻzgaradi.

Kristal holatda KEM atomlari uch karra ionlashgan holatda, kristall panjara tugunlarida joylashadilar. $5d^1 6s^2$ -qobiqlardagi elektronlar, kristall panjara hosil boʻlish jarayonida, panjara ichida umumlashgan, yaʼni elektr tok hosil qilishda ishtirok etadigan elektronlarga aylanadi. Bu metallarda 4f-qobigʻning effektiv radiusi (r_{4f}) kristall panjara tugunlari orasidagi eng qisqa masofa – a panjara davridan ancha kichikdir, yaʼni, $r_{4f} \gg a/2$. Ulardagi 4f-qobiqlardagi elektronlar kristall panjara tugunida oʻtroqlashgan boʻlib, tashqi $5s^2 5p^6$ -toʻlgan qobiqlar bilan atrofdagi ionlar maydonidan ekranlashgandir. Shuning uchun ham 4f-elektronlar KEM da xuddi erkin atom va ionlardek energetik holatda boʻladi. KEM ning “Erkin ion” modelining mohiyati shundan iboratdir. KEM uchun bu modelning oʻziga xos tomoni shundaki, birinchidan, 4f-elektronning tugunlararo bevosita taʼsiri (f-f) mavjud emas deb qaraladi; ikkinchidan esa, tugunlardagi 4f-elektronlar orasida spin-orbital (*) oʻzaro taʼsir deb ataladigan taʼsir kuchli boʻlib, bunda 4f-elektronning S-spin va L-orbital momentlari Russel-Saunders bogʻlanishi boʻyicha qoʻshilib, ionning toʻla mexanik momenti – J Xundning uchinchi qoidasiga asosan topiladi: 4f-qobiq yarmigacha

to'lganda (yengil KEM uchun) $J=L-S$, yarmidan ortig'iga to'lganda (og'ir KEM uchun) $J=L+S$ kabi topiladi.

Spin-orbital bog'lanish energiyasi 4f-elektronlarning birinchi uyg'ongan va asosiy holat energiyalarining farqi (ΔE) orqali aniqlanadi. KEM ionlaridagi eng past energiya sathlarining joylashish tartibi bu elementlarning magnit xossalarini belgilaydi. Energetik sathlar haqidagi malumotlar esa fluorestent va infraqizil nurlarning optik yutilish spektridan tajribada aniqlanadi. Nazariy jihatdan energetik sathlar sxemasi Gaudsmit [5] va Landening intervallar qoidasi [6] yordamida aniqlanadi. Gaudsmit formulasi bo'yicha ΔE quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta E = \frac{8\pi^4 m e^2 (2L + 1)}{(c^3 n^5 h^3 l(l + 1)(2L + 1))(Z - \sigma)} \quad (1.1)$$

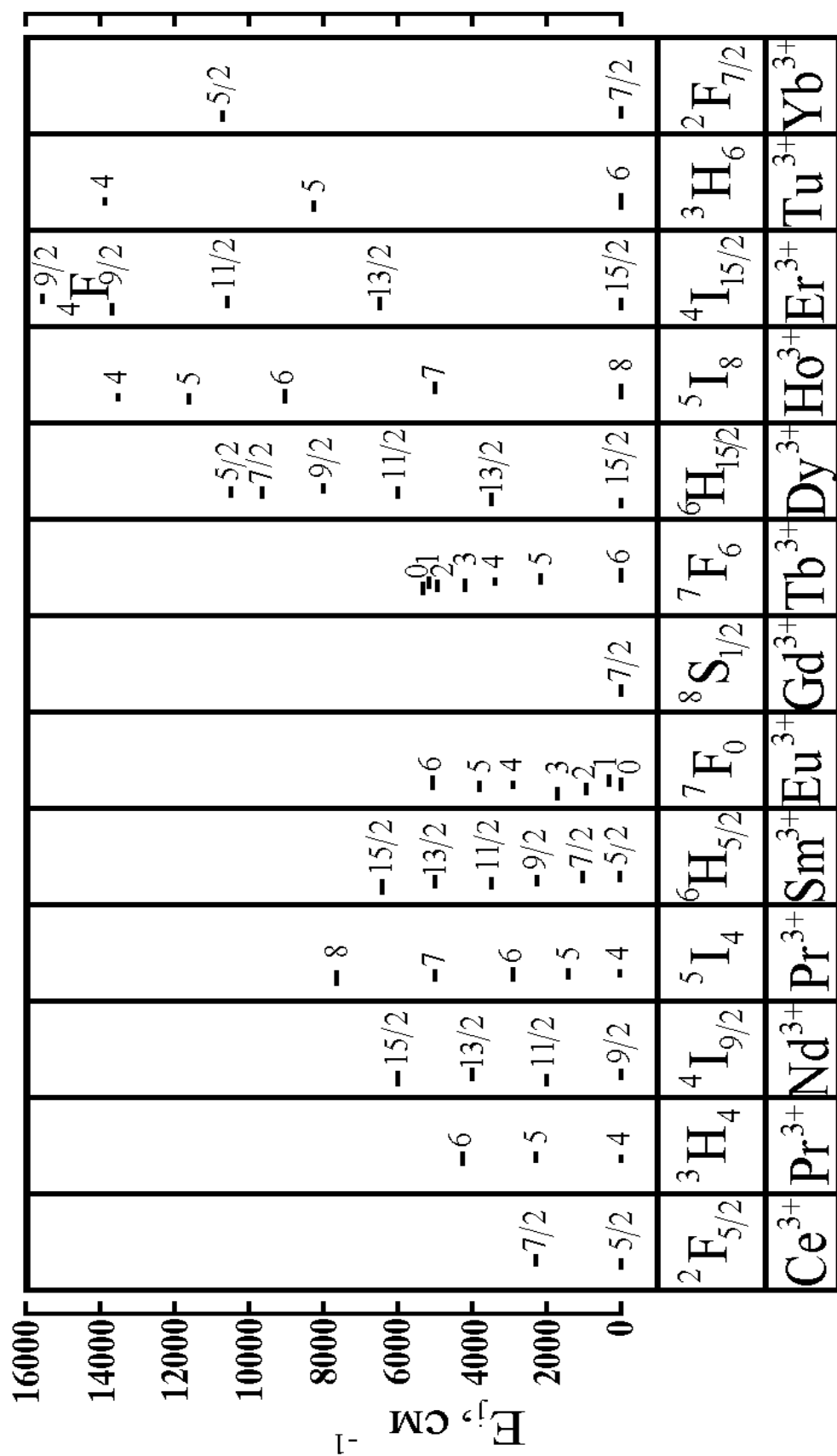
Bunda, ΔE -asosiy va uyg'ongan sathlar energiyalarining farqi, e -elektronning zaryadi, m -elektronning massasi, h -Plank doimiysi, n - va l – mos ravishda, bosh va orbital kvant sonlari, L -4f-qobiqdagi elektronlarning to'la orbital kvant soni, Z -atomning tartib nomeri, σ -ekranlash doimiysi.

Landening intervallar qoidasining mohiyati quyidagicha:

$$E_J - E_{J-1} = A E_J \quad (1.2)$$

Buda, $E_J - J$ ga mos energetik sath energiyasi, A – spin orbital bog'lanish doimiysi.

(1.1) Ifodada $35 \leq 36$ deb qabul qilib va (1.2) ifoda bilan hisoblash natijalari (1.1.rasm) va spektroskopik tajribalarning natijalari shuni ko'rsatadiki, og'ir KEM uchun $E \geq 1000 \text{ sm}^{-1}$. Issiqlik energiyasi (kT) 300K da $208,5 \text{ sm}^{-1}$ ga, 1500K da esa $1042,25 \text{ sm}^{-1}$ ga tengdir. Bu esa og'ir KEM uchun $\Delta E \gg kT$ shart bajariladi deb aytishga imkon beradi. KEM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi haqidagi malumotlar 1.1 – jadvalda keltirilgan.



1.1-rasm.KEM³⁺ erkin ionlaridagi 4f-elektronlarning energetik sathlari.

KEM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi

Z	Element	Atomlar uchun		KEM ³⁺ ionlari uchun					
		Elektron konfiguratsiya	Term	Elektron konfiguratsiya	S	L	J	Term	E _{J+1} , sm ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
57	La	4f ⁰ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	² D _{3/2}	4f ⁰ 5S ² 5P ⁶	0	0	0	¹ S ₀	-
58	Ce	4f ¹ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	³ H ₄	4f ¹ 5S ² 5P ⁶	1/2	3	5/2	² F _{5/2}	2253
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
59	Pr	4f ³ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁶ I _{9/2}	4f ³ 5S ² 5P ⁶	1	5	4	³ H ₄	2171
60	Nd	4f ⁴ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁵ I ₄	4f ⁴ 5S ² 5P ⁶	3/2	6	9/2	⁴ I _{9/2}	2028
61	Pm	4f ⁵ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁶ H _{5/2}	4f ⁵ 5S ² 5P ⁶	2	6	4	⁵ I ₄	-
62	Sm	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁷ F ₀	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶	5/2	5	5/2	⁶ H _{5/2}	1100
63	Eu	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁸ S _{7/2}	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶	3	3	0	⁷ F ₀	350
64	Gd	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	⁹ D ₂	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶	7/2	0	7/2	⁸ S _{7/2}	-
65	Tb	4f ⁸ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	⁸ H _{17/2}	4f ⁸ 5S ² 5P ⁶	3	3	6	⁷ F ₆	2101
66	Dy	4f ¹⁰ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁵ I ₈	4f ⁹ 5S ² 5P ⁶	5/2	5	15/2	⁶ H _{15/2}	3200
67	Ho	4f ¹¹ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁸ I _{15/2}	4f ¹⁰ 5S ² 5P ⁶	2	5	8	⁵ I ₈	5050

68	Er	$4f^{12}5s^25p^66s^2$	3H_6	$4f^{11}5s^25p^6$	3/2	6	15/2	$^4I_{15/2}$	8000
69	Tm	$4f^{13}5s^25p^66s^2$	$^2F_{7/2}$	$4f^{12}5s^25p^6$	1	5	6	3H_6	8250
70	Yb	$4f^{14}5s^25p^66s^2$	1S_0	$4f^{13}5s^25p^6$	1/2	3	7/2	$^2F_{7/2}$	1030 0
71	Lu	$4f^{14}5s^25p^65d^16s^2$	$^{22}D_{3/2}$	$4f^{14}5s^25p^6$	0	0	0	1S_0	-

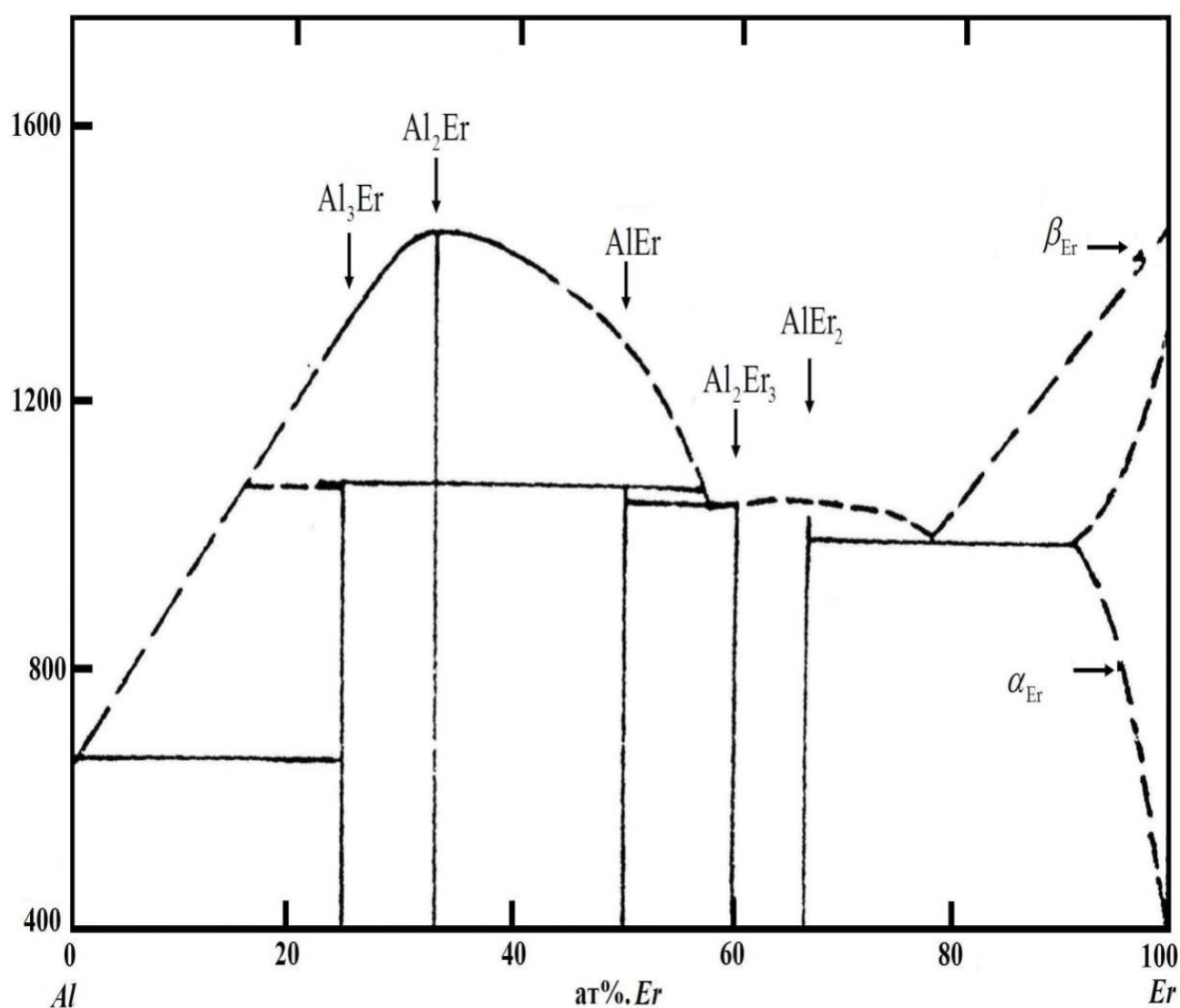
1.2. Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalarining holat diagrammalari.

O'rganilayotgan intermetallik brikmalarning magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bo'g'lanishini ($\chi(T)$) o'lchash uchun, dastlab shu brikmalar tegishli bo'lgan sistemalarning holat diagrammalari haqidagi ma'lumotlarni bilish zarur bo'ladi. Holat diagrammasidan, brikmalarning temperaturasi bo'g'liq ravishda, ularda yuz beradigan fazaviy o'tishlarning (polimorf o'tish, erish va h.z.) temperaturalarini aniqlash mumkin. Brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishni o'lchash jarayonida, shu temperaturalarda χ -ning o'zgarishi haqida ma'lumot olishda holat diagrammasi zarur bo'ladi. Quyida o'rganiladigan uchta Er-NM sistemasining holat diagrammalari qisqacha bayon qilinadi.

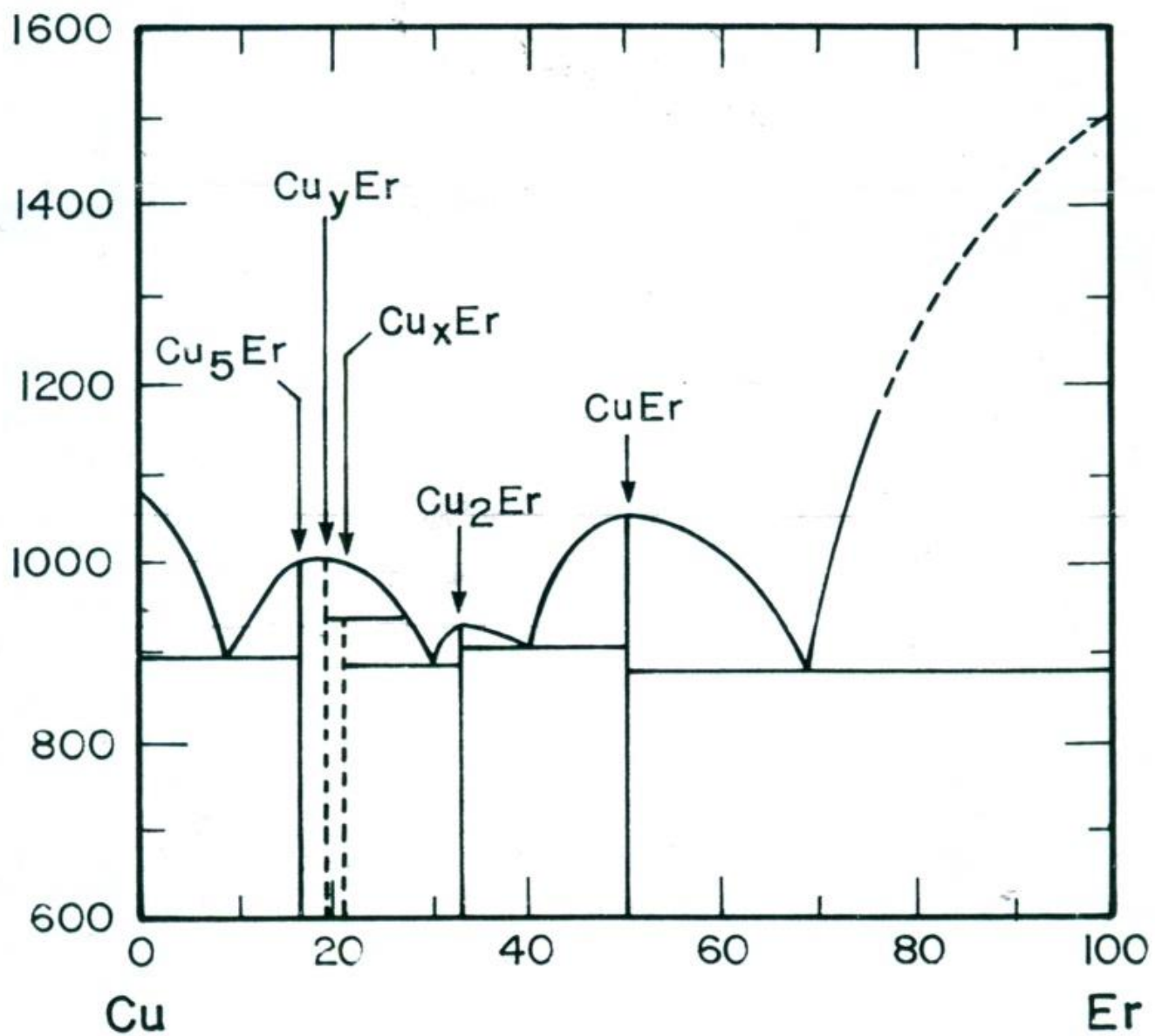
Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalarining holat diagrammalari 1.2-1.4 rasmlarda keltirilgan. Bu rasmlardagi diagrammalarni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, Er-Al sistemasida beshta ($Al_3Er, Al_2Er, AlEr, Al_2Er_3, AlEr_2$)[7], Er – Cu sistemasida doimiy tarkibli uchta ($Cu_5Er, Cu_2Er, CuEr$) [8] va Er-In sistemasida beshta ($Er_2In, Er_5In_3, ErIn, Er_3In_5, ErIn_3$)[9] intermetallik brikma hosil bo'ladi. Er-Al sistemasidagi beshta brikmalardan Al_2Er va Al_2Er_3 kongruent eriydigan, qolganlari esa peritektik eriydigan brikmalardir. Er – Cu sistemasidagi uchta brikma ham

kongruent eriydigan birikma hisoblanadi. Er – In sistemasidagi Er_2In birikmasi peritektik eriydigan, qolganlari esa kongruent eriydigan birikmalardir.

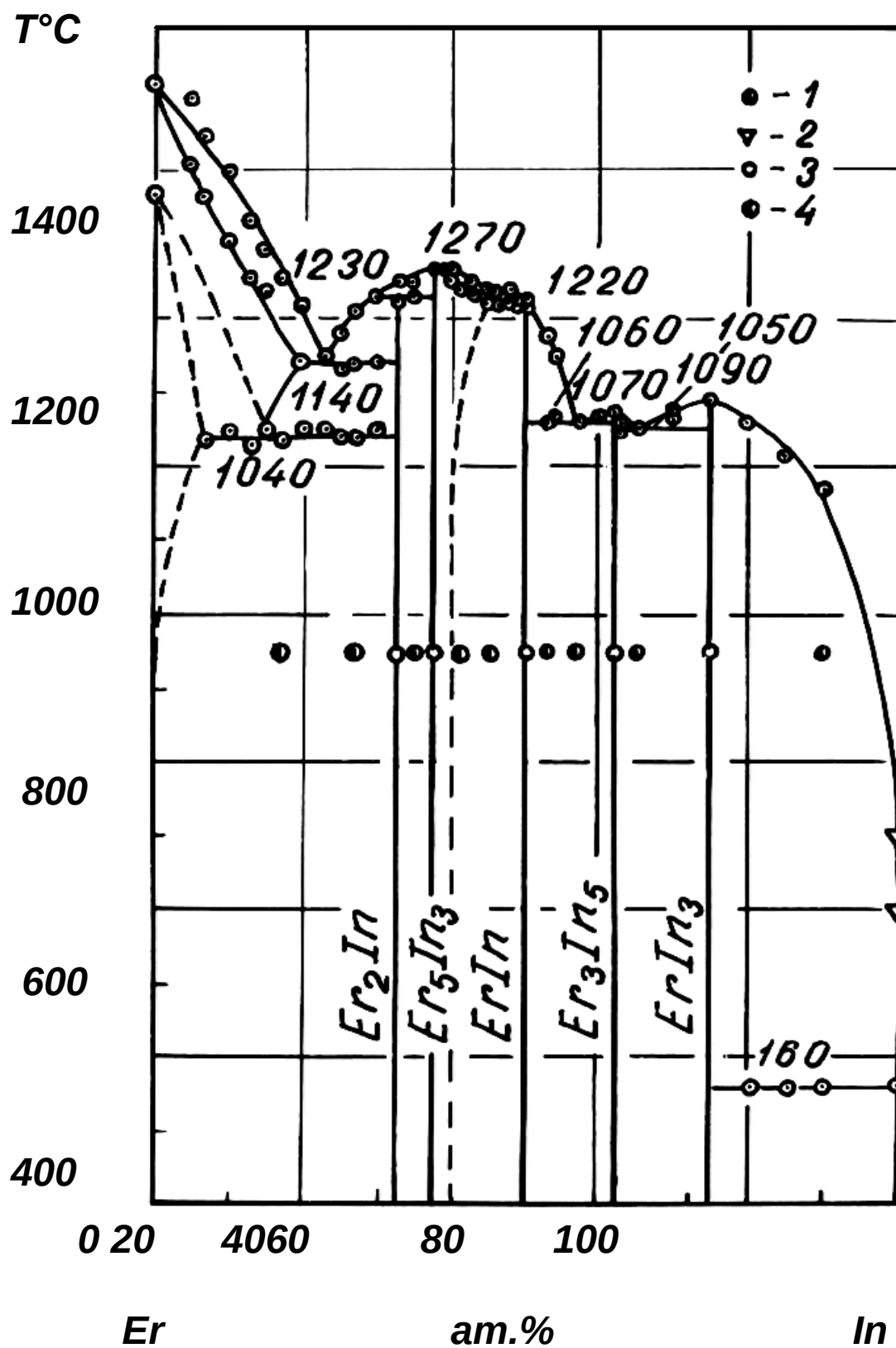
Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi brikmalarda yuz beradigan fazaviy o'tish temperaturalarini shu brikmalarning 1.2-1.4 rasmlarda keltirilgan holat diagrammalaridan aniqlash mumkin.



1.2-rasm Er-Al sistemalarini holat diagrammasi [7].



1.3-rasm Er-Cu sistemalarining holat diagrammasi [8].



1.4-rasm Er-In sistemalarining holat diagrammasi [9].

1.3. KEM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.

Erkin ionlardagi kechikib to'ladigan elektron qobiqdagi elektronlarning energetik sathlari energiyasi E -ni bilgan holda Van-Flek tomonidan ishlab chiqilgan paramagnetizmning kvanto-mexanik nazariyasi natijalaridan [1,10,11] foydalanib, shunday erkin ionlar sistemasidagi paramagnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'liqligini hisoblash mumkin.

Sistema og'ir KEM ionlaridan tashkil topgan deb faraz qilaylik. Sistemadagi har bir ionning asosiy va birinchi uyg'ongan holat energiyasi farqi issiqlik energiyasidan juda katta bo'lganda ($\Delta E \gg k_B T$) Van-Flek nazariyasi shu sistemaning solishtirma magnit qabul qiluvchanligi uchun quyidagi ifodani beradi:

$$\chi = \frac{N_A}{M} \frac{g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} + \frac{N_A \alpha_J}{M}. \quad (1.3)$$

Bunda, N_A -Avagadro soni; M -berilgan KEM ning atom massasi; k_B -Boltsman doimiysi; T -Absolyut temperature; μ_B -Bor magnetoni; g_J -Lande faktori

Lande faktori quyidagicha aniqlanadi:

$$g_J = 1 + [S(S+1) + J(J+1) - L(L+1)] / 2J(J+1). \quad (1.4)$$

(1.3) dagi ikkinchi qo'shiluvchi temperaturaga bog'liq bo'lgan Van-Flek paramagnetizmi. Undagi α_J quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha_J = \frac{\mu_B^2}{6(2J+1)} \left[\frac{F_{J+1}}{E_{J+1} - E_J} - \frac{F_J}{E_J - E_{J-1}} \right]. \quad (1.4)$$

Bu ifodadagi F quyidagicha aniqlanadi:

$$F_J = \frac{1}{J} [(S+L+1)^2 - J^2] \cdot [J^2 - (S-L)^2]. \quad (1.5)$$

(1.3) ifodadagi birinchi qo'shiluvchi magnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'liq qismini $\chi(T)$, aniqroq qilib aytganda KEM ning kristall panjarasi tugunlarida

o`rtoqlashgan 4f-qobiq elektronlarining magnit qabul qiluvchanligini, ikkinchi qo`shiluvchi $\frac{N_A}{M}\alpha_J = \chi_0$ temperaturaga bog`liq bo`lmagan qismini ifodalaydi. Demak (1.3) ifodadan ko`rinadiki  $\Delta E \gg k_B T$  shart bajarilganda yuqori temperatura va kuchsiz magnit maydonida  $\left(\frac{\mu_B H}{k_B T} \ll 1\right)$  KEM ning erkin ionlari sistemasining magnit qabul qiluvchanligi, ionlar asosiy holatining to`la mexanik moment kvant soni J va temperaturasi T bilan aniqlanar ekan $\chi_0 = \frac{N_A \alpha_J}{M} = 0$ bo`lganda (1.3) ifoda quyidagi klassik Xund formulasiga aylanadi:

$$\chi = \frac{N_A}{M} g_J^2 J(J+1) \mu_B^2 / 3k_B T. \quad (1.7)$$

Agar

$$C = \frac{N_A}{M} g_J^2 J(J+1) \mu_B^2 / 3k_B = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_{eff}^2}{3k_B}. \quad (1.8)$$

belgilash kiritilsa, (1.7) ifoda Kyuri empirik qonuninig analitik ifodasiga aylanadi:

$$\chi = \frac{C}{T}. \quad (1.9)$$

(1.8) ifodada belgilangan μ_{eff} kattalik

$$\mu_{eff} = g_J [J(J+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B \quad (1.10)$$

KEM erkin ioni effektiv magnit momentining nazariy qiymatini aniqlaydi. Bu kattalikning tajribaviy qiymatini aniqlash uchun (1.8) dan quyidagi ifodani olish mumkin:

$$\mu_{\phi\phi} = \frac{1}{\mu_B} \left(\frac{3k_B}{N_A} \right)^{1/2} (MC)^{1/2} \mu_B = 2,83 (MC)^{1/2} \mu_B. \quad (1.11)$$

KEM ionlarning magnit oʻzaro taʼsiri, energiyaga proportsional boʻlgan, Kyurining paramagnit temperaturasi deb ataladigan, θ_p kattalikni (1.3) ifodaning birinchi hadi maxrajida $T \rightarrow (T - \theta_p)$ almashtirish olish bilan hisobga olish mumkin [1,5]. Buni hisobga olganda (1.9) ifoda Kyuri-Veyss qonunining analitik ifodasiga aylanadi:

$$\chi = C / (T - \theta_p). \quad (1.12)$$

Yengil kamyob yer metallari uchun χ_0 ning qiymatini hisobga olmaslig mumkin emasligini hisobga olsak (1.3) dan Kyuri-Veyss qonunining umumlashgan ifodasini olamiz:

$$\chi = \frac{C}{(T - \theta_p)} + \chi_0. \quad (1.13)$$

KEM ionlarining asosiy magnit xarakteristikalarini 1.2 – jadvalda keltirilgan.

KEM³⁺ ionlarining asosiy magnit xarakteristikalari[1-3,5,12] **1.2-jadval**

KEM ³⁺	J (asosiy sath)	g _J	g _J [J(J+1)] ^{1/2} μ _B nazariy	μ _{eff} , μ _B Van- Flekpara.bilan, nazariy	μ _{eff} , μ _B tajr.	E _{J+1} , sm ⁻¹
La	0	0	0	0	Diam.	-
Ce	5/2	6/7	2,54	2,56	2,39	2253
Pr	4	4/5	3,58	3,62	3,60	2171
Nd	9/2	8/11	3,62	3,68	3,62	2028
Pm	4	3/5	2,68	2,83	-	-
Sm	5/2	2/7	0,84	1,55	1,54	1100
Eu	0	0	0	3,4	3,61	350
Gd	7/2	2	7,94	7,94	8,2	-
Tb	6	3/2	9,72	9,72	9,60	2101
Dy	15/2	4/3	10,63	10,63	10,5	3200
Ho	8	5/4	10,60	10,60	10,5	5050
Er	15/2	6/5	9,59	9,59	9,5	5000
Tm	6	7/6	7,57	7,57	7,2	8250
Yb	7/2	8/7	4,54	4,54	4,4	10300
Lu	0	0	0	0	Diam.	-

1.4. Bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir na'zariyasi.

Kechikib to'ladigan qobiqqa ega bo'lgan atomlardan (aniqrog'i, kristall panjara tugunlarida joylashgan ionlardan) tashkil topgan metallarning kuchli magnit xossasini (magnit tartiblangan holatini) shu qobiq elektronlarning tugunlararo magnit o'zaro ta'siri hosil qiladi. Bunday o'zaro ta'sir **almashinuv o'zaro ta'sir** nomi bilan ataladi. Kamyob Yer metallari (KEM) (yoki lantanoidlar) kristall panjarasi tugunlarida, 4f – kechikib to'ladigan elektron qobiqqa ega bo'lgan, ionlar joylashadilar.

4f qobiq elektronlari $5s^2 5p^6$ qobiqlardagi elektronlar bilan tashqi ta'sirlardan himoyalangan bo'ladi. Shu sababga ko'ra ularning tugunlararo bevosita o'zaro ta'siri (f – f o'zaro ta'sir deb ham ataladigan) amalga oshmaydi. Demak ularning magnit tartiblangan holatini bunday bevosita o'zaro ta'sir hosil qila olmaydi. Tajribalar ko'rsatadiki, bunday holat past temperaturalarda (masalan Gd uchun bu temperatura eng yuqori hisoblanadi – 292 K) hosil bo'lar ekan. Bunday tartiblangan holatni 4f – qobiq elektronlarining o'tkazuvchan - $6s^2$ va $5d^1$ -elektronlar (ya'ni tugunlar orasida umumlashgan elektronlar) orqali o'zaro ta'siri hosil qilar ekan. Bunday o'zaro ta'sir f – S – f, qisqacha S-f o'zaro ta'sir yoki **bilvosita almashinuv o'zarota'sir** deyiladi [1]. Bunday o'zaro ta'sir nazariyasi KEM uchun birinchi marta Ruderman, Kittel, Kasuya va Iosidalar tomonidan ishlab chiqilgani uchun **RKKI nazariyasi** ham deb yuritiladi. Bu nazariya [1]da batafsil yoritilgan.

KEMning paramagnit Kyuri temperaturasi - θ_p RKKI o'zarota'sir energiyasining o'lchovi hisoblanadi va u quyidagi ifoda bilan aniqlanadi [1]:

$$\theta_p = \frac{3\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) (g_I - 1)^2 I(I+1) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F (\vec{R}_n - \vec{R}_m)), \quad (1.14)$$

bu yerda n – umumlashgan elektronlar konsentratsiyasi; $A_{sf}(0)$ - bilvosita S-f o'zaro ta'sir doimiysi (integrali); E_F -Fermi sathi energiyasi; k_F – Fermi sirtining to'lqin vektori; $(\vec{R}_n - \vec{R}_m)$ – n- va m-tugunlar orasidagi masofa;

$$F(x) = F(2\vec{k}_F (\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = (x \cos x - \sin x) / x^4 \quad (1.15)$$

– Ruderman – Kittel funksiyasi.(1.14) ifodadagi

$$G = (g_I - 1)^2 I(I + 1) \quad (1.16)$$

kabi aniqlanuvchi G – kattalikka de Jen faktori deyiladi. Bu ifodadagi g_I -Lande faktori deyilib quyidagicha aniqlanadi:

$$g_I = 1 + \frac{J(J + 1) + S(S + 1) - L(L - 1)}{2J(J + 1)}, \quad (1.17)$$

bundagi L , S va J 4f -qobiqdagi elektronlarning to'liq orbital, spin va to'la mexanik moment kvant sonlari.

RKKI nazariyasi bo'yicha KEM da almshinuv o'zaro ta'sir parametri (integrali) ni hisoblash uchun quyidagi ifoda olingan [1,4]:

$$A = \frac{9\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) \sum_{n \neq m} F(2k_F (\vec{R}_n - \vec{R}_m)). \quad (1.18)$$

Buni hisobga olgan holda (1.14)dan quyidagi ifodani olamiz:

$$\theta_p = \frac{1}{3k_B} AG. \quad (1.19)$$

1.5. Erbiy va uning NM (NM=Al,Cu,In) bilan brikmalarining yuqori temperayuralardagi magnit xossalari

Toza KEM ning magnit xossalari 300 K dan past temperaturalarda, ya'ni ularning magnit tartiblangan holatida, bugungi kunda etarli darajada o'rganilgan. Bunday tadqiqotlarga [1,2,3,4]ishlarda umumlashtirilib sharh berilgan.

Dissertatsiya maqsadiga ko'ra, KEM ning magnit xossalarini 300 K dan yuqori temperaturalarda, aniqrog'I ularning suyuq holatini ham qamraydigan yuqori temperaturalarda, olib borilgan tadqiqotlarni qarash o'rinlidir. Toza erbining magnit xossalari bunday temperaturalarda [13-14] ishlarda o'rganilgan.

[13]-ishda Er-ning $\chi(t)$ bog'lanishi 300-1500 K temperaturalar oralig'ida, ya'ni qattiq holatda o'lchangan. Bu bog'lanish, asosida paramagnitizmning Van-Flek nazariyasi yotadigan, uch zaryadli KEM erkin ionlari modeli bo'yicha tushintirilgan.

[14]-ishda brinchi marta erbiyning $\chi(t)$ bog'lanishi, uning suyuq holatini ham qamraydigan , 300-2000 K temperaturalar oralig'da o'lchangan. Bu ishda erbiy $\chi(t)$ bog'lanishining qattiq holatda ham, suyuq holatda ham Kyuri-Vess qonuniga bo'ysinishi qayd etilgan. Erish jarayonida $\chi(t)$ bog'lanishda kuchsiz sakrash yuz berishi aniqlangan. Shuningdek asosiy magnit xaraktrestikalar - paramagnit Kyuri temperaturasi ($\Theta_p = 58\text{ K}$) va bitta Er^{3+} ioniga tug'ri keladigan magnit moment ($\mu_{eff} = 9.58\mu_B$) aniqlangan.

KEM-NM sistemasida hosil bo'ladigan intermetallik brikmalarning magnit xossalari ham 300 K dan past temperaturalarda, 300 K dan yuqori temperaturalarga nisbatan, ko'p o'rganilgan. Shu yo'nalishdagi ishlar umumlashtirilib [2,4,15] ishlarda sharh berilgan.

[16] - ishda KEM-Al (KEM=Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er) sistemasidagi brikmalarning $\chi(t)$ bog'lanishlarini 4,2-300 K temperaturalar oralig'ida o'rganilgan

va barcha brikmalar uchun bu bog'lanishlar Kyuri-Vess qonuniga bo'ysinishi aniqlangan.

[17,18] - ishlarda $KEMAl_2$ ($KEM=Gd, Dy, Ho, Er$) brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlarini 50-300 K temperaturalar oralig'ida o'lchangan. Tajriba natijalaridan foydalanib effektiv magnit momentlar hisoblangan.

[19] - ishda Al_2KEM (Gd, Dy va Ho) intermetalik birikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishi 290-2000K temperaturalar oralig'ida o'lchangan bu bog'lanish Kyuri-Veyss qonuniga bo'sinishi aniqlangan. Bitta KEM atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment aniqlangan.

[20] - ishda $KEM-In$ sistemasida hosil bo'ladigan KEM_3In ($KEM = Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er$) intermetillik brikmalarning magnit xossalari 4,2-300 K temperaturalar oralig'ida o'rganilgan. Bu ishning natijasi bo'yicha $KEMIn_3$ ($KEM=La, Sm, Yb$) brikmalardan boshqa barcha brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari Kyuri-Vess qonuniga bo'ysinadi.[21] - ishda KEM_2In ($KEM = Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm$) brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari 4.2-270 K temperaturalar oralig'ida o'rganilgan. Y_2In va Sm_2In - brikmalardan boshqa barcha brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari Kyuri-Vess qonuniga bo'ysinar ekan. $Er-(Al, Cu, In)$ sistemalaridagi birikmalarning asosiy magnit xarakteristikalarini 1.4-jadvalda keltirilgan.

Er-(Al,Cu,In) sistemasidagi birikmalarning magnit xossalari[4,13,15]

Birikma	μ_{eff}, μ_B	Θ_p, K
Er	9.79	42.2
Er ₃ Al ₂	9.6	-3
Er ₂ Al	9.89	-8
ErAl	10.1	28
ErAl ₂	9.56	16
ErAl ₃	9.87	6
ErCu	9.6	-12
ErCu ₂	9.35	
ErCu ₅	9.7	0
Er ₂ In	9.8	42
ErIn ₃	9.75	-10

1.6. Tadqiqot muammosining qo'yilishi.

Yuqoridagi adabiyotlar sharhidan shu ma'lum bo'ladiki, bugungi kunda KEMning Al,Cu,In metallari bilan birikmalarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda, xususan uning paramagnit qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan keng yuqori temperaturalar oralig'ida o'rganishga bag'ishlangan ishlar hali adabiyotlarda kam. Shunday sharoitlarda olingan ma'lumotlar KEMning nomagnit metallar bilan birikmalarining elektron tuzilishi va yuqori temperaturalar uchun paramagnit holati nazariyasini yanada mukammal yaratilashiga xizmat qilgan bo'lar edi. Shuni hisobga olib ushbu magistrlik dissertatsiyasida quyidagi vazifalarni yechish dolzarb masala qilib qo'yildi:

1. Er-NM(NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishlarini $[\chi(T)]$ ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan yuqori temperaturalar oralig'ida o'lchash va o'lchash natijalarini nazariy jihatdan tushuntirish;

2. O'rganilayotgan namunalarning $\chi^{-1}(T)$ tajribaviy bog'lanishlaridan foydalanib, ularning asosiy magnit xarakteristikalarini – paramagnit Kyuri temperaturasi (θ_p), Kyuri – Veyss doimiysi (C) va bitta Er atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentni(μ_{eff}) aniqlash;

3. Tajribaviy paramagnet Kyuri temperaturalari qiymatidan foydalanib o'rganilgan namunalardagi bilvosita o'zaro ta'sir parametrini hisoblash;

4. Olingan natijalarni chuqur tahlil qilib tegishli xuloalar chiqarish.

I-bobga doir xulosalar

1. Magistrlik dissertatsiyasi tadqiqot obektlarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganish uchun zarur bo'lgan, quyidagi yo'nalishdagi xossalarini adabiyotlarda o'rganilganlik darajasiga sharh berilgan:

1. KEMning elektron tuzilishi;
2. Er-NM (NM=Al,Cu,In) binar sistemalarining holat diagrammalari;
3. KEM uchun paramagnetizmning kvant Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari;
4. Er va uning nomagnit metallar bilan birikmalarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganishga bag'ishlangan ishlar;
5. Adabiyotlar sharhidan kelib chiqqan holda, magistrlik dissertatsiyasi mavzusining dolzarbligi va maqsadi asoslangan.

II-BOB. O'LCHASH USULI VA TEXNIKASI.

NAMUNALARNI TAYYORLASH.

2.1. Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash usullari.

Ko'rilayotgan masalaning xarakteriga qarab magnit qabul qiluvchanlikni o'lchashning bir necha xil usullari qo'llaniladi. Moddalarning magnit xarakteristikalarini tekshirishda, ularga magnit maydonning ta'siriga bog'liq ravishda, bir necha xil tekshirish usullari mavjud [11,22]. magnit xossaga ega bo'lgan moddalarning paramagnit qabul qiluvchanligini tekshirish usullari ikki guruhga bo'linadi. Birinchi guruhga o'zaro yoki o'zinduksiya koeffisientining o'zgarishini aniqlaydigan usullar kiradi. Bu usullar o'zining eksperimental jihatidan qiyinligi sababli keng qo'llanilmaydi.

Ikkkinchi guruhga kirgan usullar bir jinsli bo'lmaga magnit maydoniga kiritilgan namunaga ta'sir qiluvchi mexanik kuchni o'lchashga asoslangan. Umumiy fizika kursidan ma'lumki [23], magnit maydoni bir jinslimasligi faqat x o'qi bo'ylab yo'nalgan bo'lsa, unga kiritilgan namunaga shu yo'nalish bo'yicha quyidagi kuch ta'sir qiladi:

$$F_x = V \vec{M}_y \left(\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} \right), \quad (2.1).$$

Bu yerda V – namuna hajmi, $\vec{M}_y$ - y o'qi bo'yicha namunaning magnitlanish vektori;

$\left(\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} \right)$ - magnit maydon kuchlanganligi gradiyentining x yo'nalishidagi tashkil

etuvchisi. (2,1) dagi F_x - kuch elektromagnit o'qiga perpendikulyar deb hisoblanadi. Ma'lumki, $\vec{M}$ - magnitlanishning maydon kuchlanganligiga nisbati **hajmiy magnit qabulqiluvchanlik** deyiladi:

$$\chi_v = \frac{M}{H}.$$

Ko'pincha magnetiklarni xarakterlash uchun hajmiy magnit qabulqiluvchanlik o'rniga solishtirma magnit qabulqiluvchanlik χ ishlatiladi:

$$\chi = \frac{\chi_v}{\rho}, \quad (2.2).$$

bunda ρ - modda zichligi. x o'qi bo'yicha ta'sir qiluvchi kuch (2.1) ni solishtirma magnit qabul qiluvchanlik orqali quyidagicha ifodalaymiz:

$$F_x = m \frac{\chi_v}{\rho} H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right) = m \chi H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right). \quad (2.3).$$

Bu ifoda ikkinchi guruh usullari yordamida magnit qabul qiluvchanlikni aniqlashda asosiy formula hisoblanadi. Bu guruhda keng tarqalgan usullar ikkita:

1. Guining integral usuli,
2. Faradeyning differensial usuli.

Gui usulini qo'llashda katta o'lchamli namunalar ishlatiladi. Bu holda silindr shaklidagi namuna elektromagnit qutblari orasiga shunday joylashtiriladiki, bunda uning bir uchi eng kichik kuchlanishli maydonda ($H_1=0$), ikkinchi uchi esa maksimal kuchlanishli maydonda ($H_2 \neq 0$) turadi. Bu holda namunaga ta'sir qiluvchi kuch quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$F_x = \frac{1}{2} \chi S (H_2^2 - H_1^2) = \frac{1}{2} \chi S H_2^2$$

bunda S – silindrning ko'ndalang kesim yuzi.

Demak, Gui usulida agar H_2 ning qiymati ma'lum bo'lsa, χ ni topish, F_x ni topish bilan hal bo'ladi. Biroq Gui usuli quyidagi kamchiliklarga ega:

1. Bu usulda katta o'lchamli namunalardan foydalaniladi. Bu iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emas. Masalan, qimmatbaho va radioaktiv metallarning ko'p miqdoridan na'muna tayyorlashga to'g'ri keladi.

2. Konteynerga (tigelga) tekshirilayotgan na'muna va etalon birjinsli joylashtirilishi zarur.

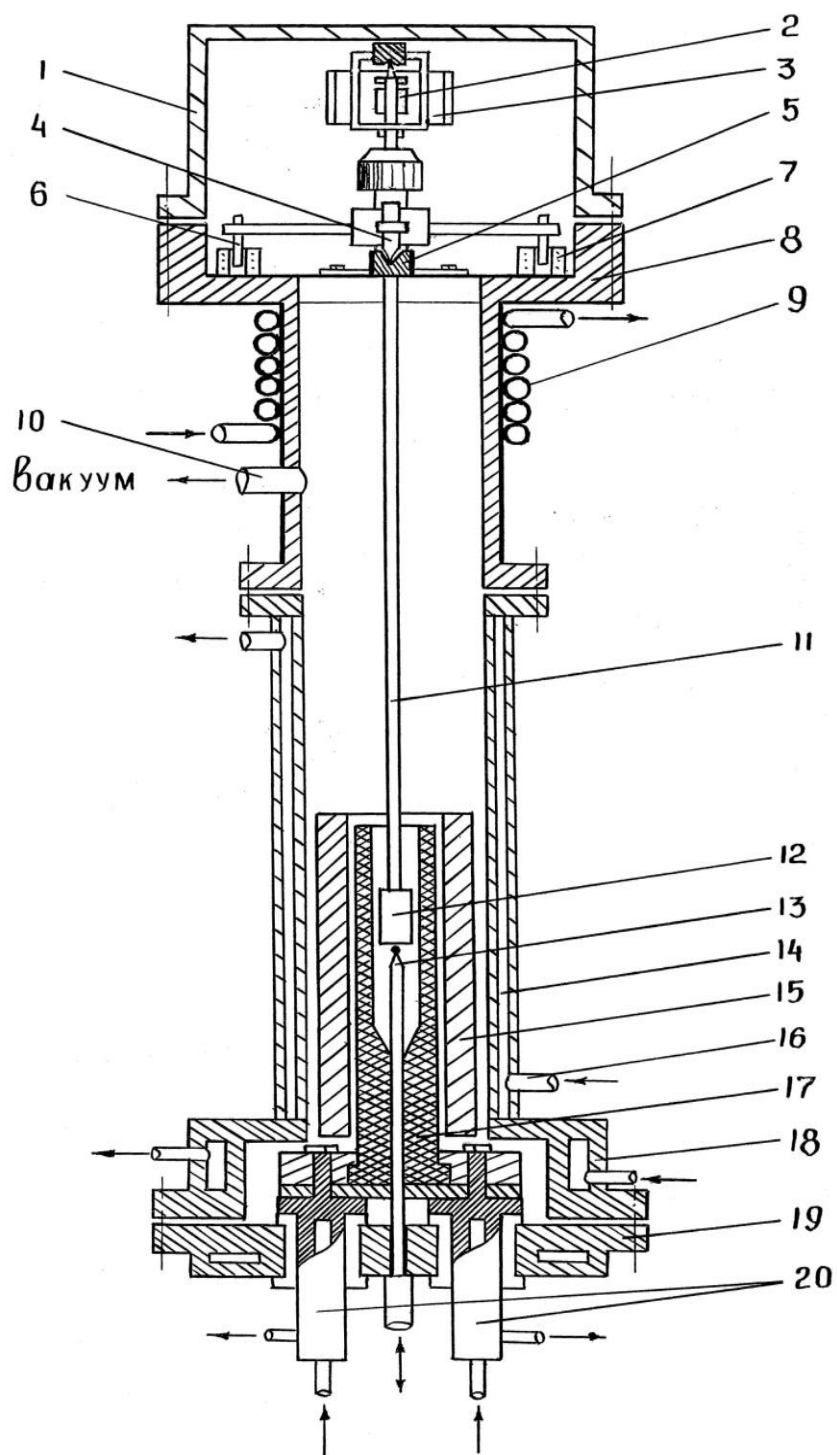
Faradey usuli esa bu kamchiliklardan xoli. Bu usulda kichik o'lchamdagi namunalardan foydalanish mumkin va (2.3) dagi $H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right)$ munosabatni o'zgarmas deb hisoblash mumkin. (2.3) bilan magnit qabul qiluvchanlikni hisoblash uchun maydon gradienti qiymatini bilish kerak. Buni to'g'ridan – to'g'ri aniqlash mumkin emas. Shuning uchun Faradey usulidan odatda nisbiy usul sifatida foydalaniladi. Tajriba vaqtida magnit maydonining aynan bir sohasiga $[H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right) = const \text{ bo'lgan}]$ na'muna va magnit qabul qiluvchanligi oldindan ma'lum bo'lgan modda-etalon navbatma – navbat joylashtiriladi. Bu shartlarni hisobga olgan holda (2.3) dan quyidagi ifodani hosil qilamiz ($F_x = F$):

$$\chi = \frac{m_{et}}{m} \chi_{et} \frac{F}{F_{et}}. \quad (2.4).$$

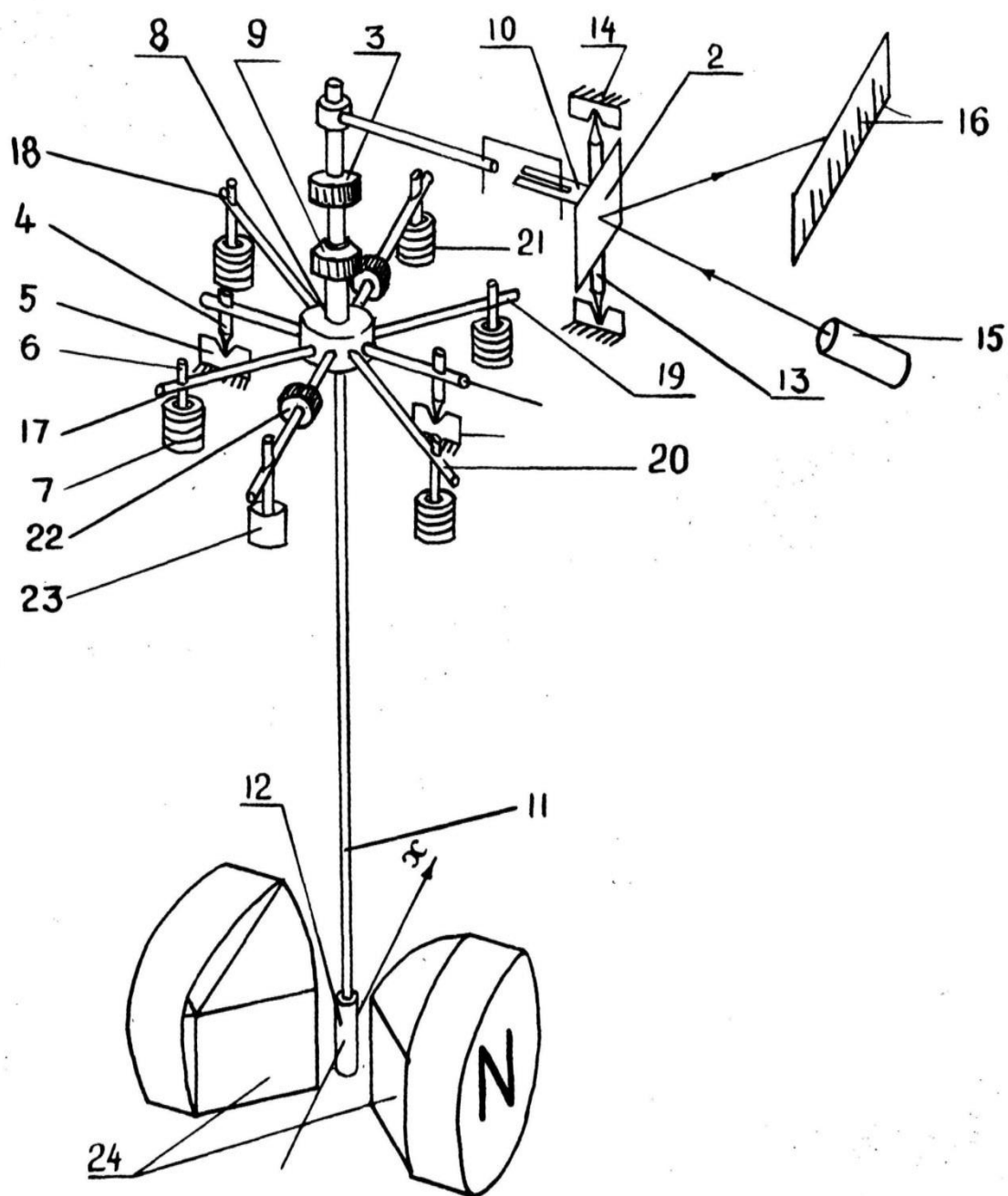
Bundagi χ, F, m va $\chi_{et}, F_{et}, m_{et}$ mos ravishda na'muna va etalonga tegishli kattaliklar. Tajriba shart –sharoitlari qulay bajarilgan holda bu usul yuqori aniqlik bilan solishtirma magnit qabul qiluvchanlikni (χ) o'lchashga imkon beradi. Bundan shunday xulosa kelib chiqadiki, yuqori temperaturalarda solishtirma magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash uchun Faradey usuli qulaydir. Ushbu ishda shu sababli shu usuldan foydalanildi.

2.2. O'lchash qurilmasining tuzilishi va ishlash prinsipi.

Tekshirilayotgan masalaning qo'yilishiga qarab xilma – xil qurilmalar yasalgan. Bu qurilmalar bir qatorda ishlarda [22-27] yoritilgan. Na'munalarning solishtirma magnit qabul qiluvchanligini o'lchashda [24-27] ishlarda bayoni osmasi keltirilgan qurilmadan foydalandik. Bu qurilma vertikal mayatnikli magnit tarozi, elektromagnit, qizdirgich va vakuum kamerasidan iborat. Qurilmaning eng asosiy qismi vertikal mayatniksimon magnit tarozidir. (2.2–rasm). Mayatniksimon magnit tarozi (2.2 – rasmda keltirilgan) mayatniksimon tarozining ikkita korund ignasi-4, ikkita agat chuqurchaga-5 kirib turadi (tayanadi). Odatda tarozining 11-vertikal halatda turadi. Bu osma (mayatnik) faqat α o'qi bo'ylab, 4-ignalar uchidan o'tadigan gorizontall o'q atrofida erkin tebrana oladi. Taroziining sezuvchanligi 3-yuk yordamida o'zgartirilishi mumkin. Taroziining osmasi diametri 2mm bo'lgan molibden simdan yasalgan. U 9-sanga yordamida 8-diskka maxkamlangan. Osmaning pastki uchida, tekshiriladigan na'muna solingan tigell joylashtiriladigan, 12-kontiner o'rnatilgan. 8-diskka 17-20 duyural sterjenlar krestavina shaklida o'rnatilgan bo'lib, ular tarozining elkasi rolini bajaradi. Krestavinaning uchlariga, 7-tokli salenoidlar magnit maydoni bilan o'zaro ta'sirlashadigan 6-doimiy magnitlar vertikal holatda mahkamlangan. Vakuum kamerasining yuqori ichki asosiga vertikal ustun o'rnatilgan. (2.1-rasm). Ustunning tepasiga o'rnatilgan ramkaning uchiga ikkita agat chuqurcha-14 mahkamlangan. Shu chuqurchalariga kirib turgan ikkita korundning uchlari n o'tadigan vertikal-13 o'q (sterjen) ga 2-ko'zgu mahkamlangan. Ko'zgu shu o'q atrofida erkin aylana oladi. Ko'zgu orqasiga mahkamlangan 10-plastinka ayrisiga tarozi mayatnigining yuqori uchiga gorizontall o'rnatilgan sterjenga mahkamlangan molibden sim kirib turadi. Shusimning uzunligi va 15-yoritgichdan 2-ko'zgugacha va ko'zgudan 16-shkalagacha bo'lgan masofa shunday tanlanganki, shkala bo'lab siljiydigan 15-yoritgich shulasi ipning siljishida, 11-osma uchidagi 12-kontrenerning magnit maydoni ta'siridagi α o'q bo'ylab siljishi 120 marta kuchaygan holda aks etadi. Elektromagnit maydonining o'lchashlarga salbiy



2.1 – rasm. Metallar va qotishmalarning qattiq va suyuq holatlaridagi magnit qabul qiluvchanligini oʻlchash qurilmasining asosiy qismi-vakuum kamerasining kesimi (ishlash prinsipi matnda tushuntirilgan).



2.2 – rasm. Yuqori temperaturalarda magnit qabulqiluvchanlikni oʻlchovchi mayatniksimon magnit tarozi.

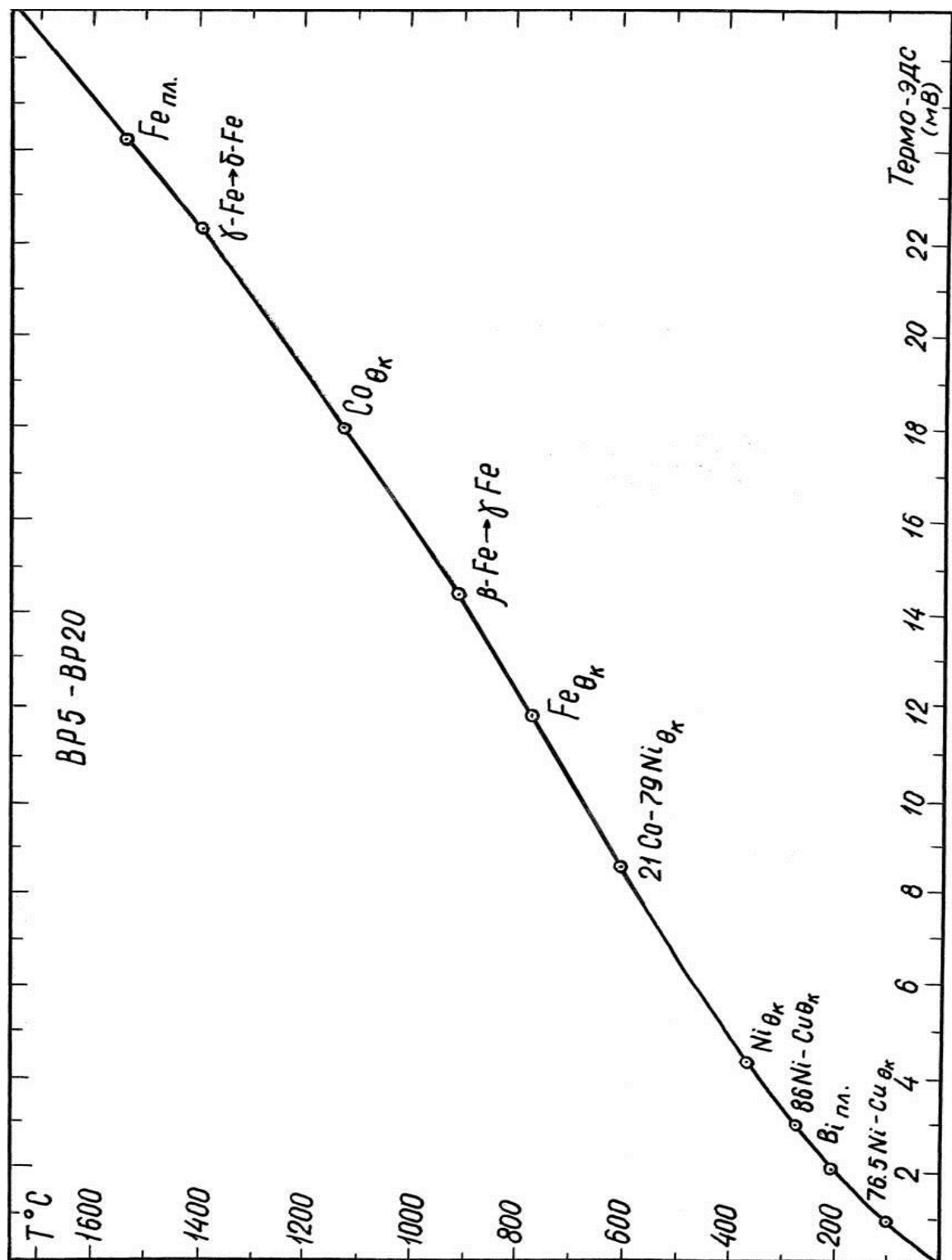
ta'sirini yo'qotish uchun tarozining hamma qismlari nomagnit materiallardan (molibden, mis, dyuralyumen, latun) yasalgan. Tarozi sistemasi tebranishlarini tez so'ndirish uchun u moyli demfer-23 bilan ta'minlangan.

Tarozining muvozanatdan chetlanishini qayd etish prinsipi quyidagicha (2.2 – rasmga qarang). Yoritgichdan ko'zguga yorug'lik tushib va undan qaytib kuzatish shkalasiga tushadi. Magnit maydoni-24 ulanganda maydon tomonidan na'munaga ta'sir qiluvchi (2.3) kuch na'sirida osma vertikal muvozanat holatdan chetlanadi va shu'la shkala bo'yicha o'rta “nol” holatdan siljiydi. 17 – 20 solenoidlarga tok berib, tokning kuchi o'zgartirilishi bilan (P33 – qarshiliklar magazini yordamida) osmani dastlabki holatga, yani shkaladagi shu'lani “nol” holatiga qaytaruvchi moment hosil qilinadi va shu'la dastlabki “nol” nolatga qaytariladi. Solenoidlar elektr zanjirdagi etalon qarshiligidagi (R_{et}) kuchlanish tushuvi $U = R_{et} I = I R_{et}$ solenoidlardagi tokka (I) proporsional bo'lib, raqam ko'rsatgichli elektron voltmetr (BK – 2-20) yordamida o'lchanadi. Solenoidlarga beriladigan tokning manbai sifatida Y1999 rusumli o'zgarmas tok stabilizatori ishlatiladi. $F_x \sim U$ bo'lganligi uchun (2.4)dan quyidagini topamiz:

$$\chi = \frac{m_{et}}{m} \chi_{et} \left(\frac{U_t - U_{tigr}}{U_{et} - U_{tigr}} \right), \quad (2.5)$$

bu yerda, U_t va U_{tigr} – t mos ravishda temperaturali tekshiriladigan namunali va namunasiz tigellar uchun solenoid zanjirlaridagi etalon qarshilikda kuchlanish tushuvlari; U_{et} va U_{tigr} uy temperaturasiidagi etalonli va etalonsiz tigellar uchun etalon qarshilikda kuchlanish tushuvlari. Etalon sifatida Mor tuzi ($\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ishlatildi. Uning T uy temperaturasiidagi solishtirma magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'liqligini quyidagicha :

$$\chi_{et} = 9500 \cdot 10^{-6} (T + 1) \text{ sm}^3 \text{ g}^{-1} \quad (2.6)$$

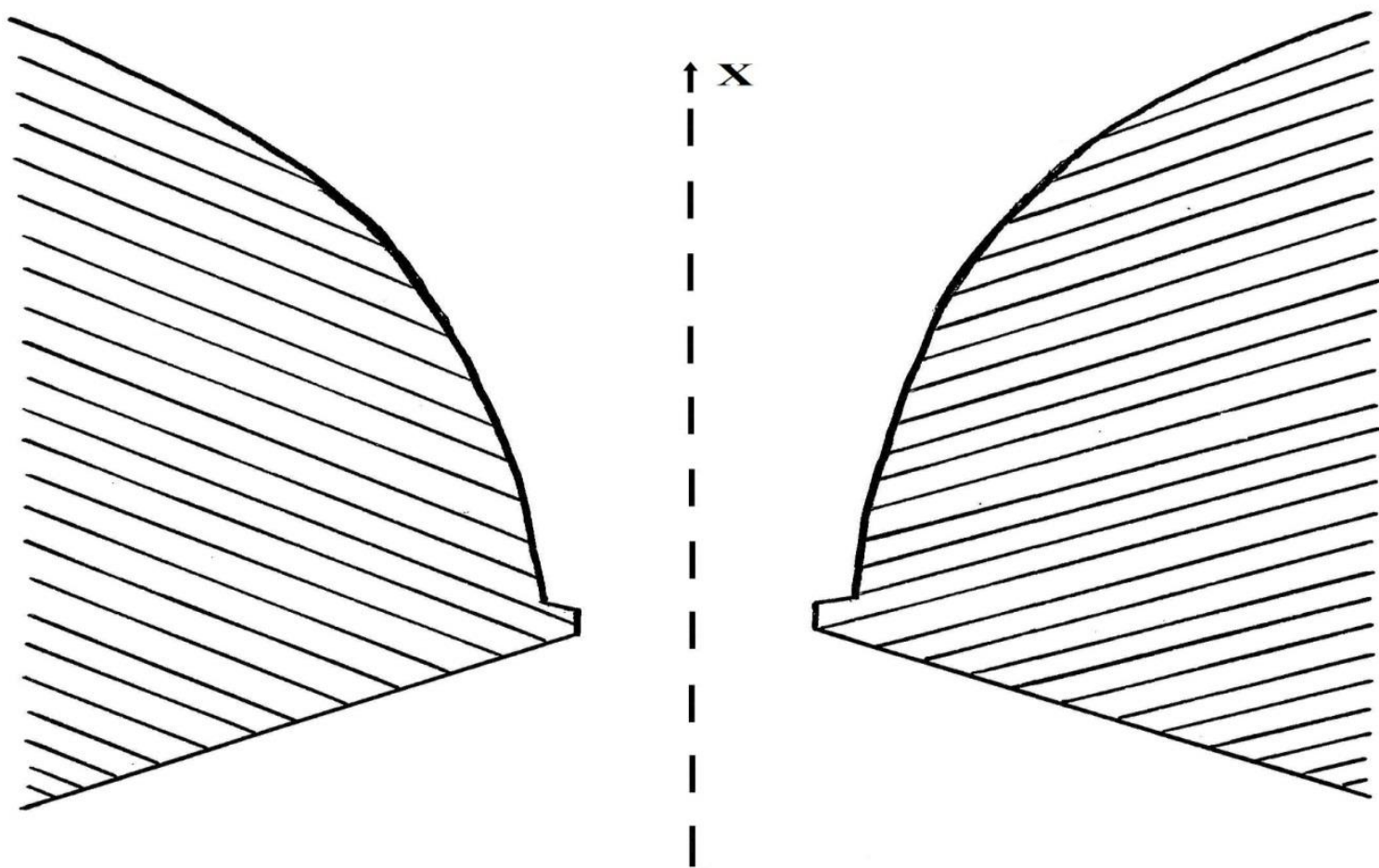


2.3 – *расм*. Волfram – рений термopарасинин даражалаш чизиг'и.

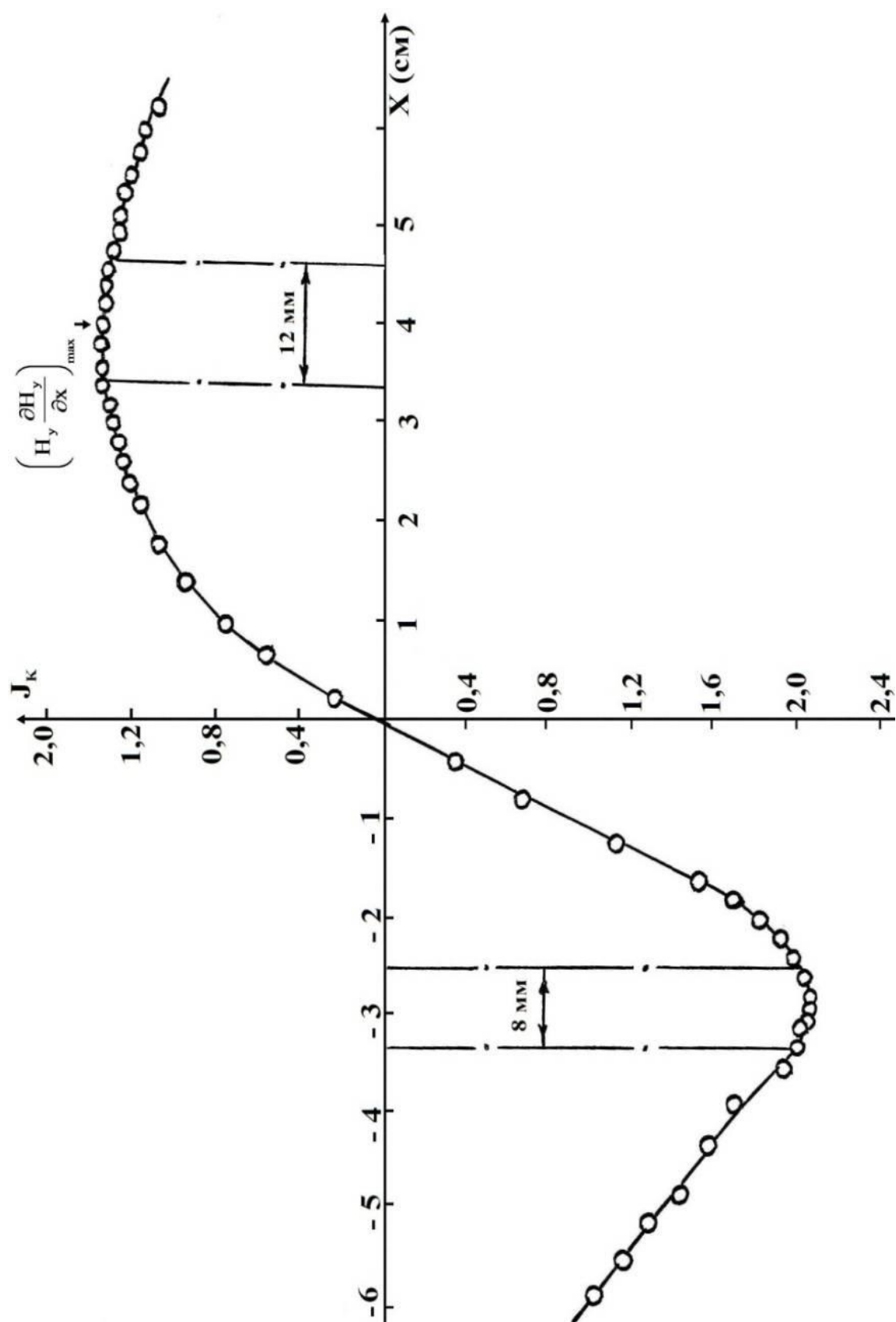
Qizdirgich. Namuna solishtirma magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'liqligini o'rganish uchun 2.1 – rasmdagi kamera ichida kesimi ko'rsatilgan trubkasimon grasitdan yasalgan qizdirgichdan foydalanildi.

U bifulyar holda yasalgani uchun undan o'tgan tokning magnit maydoni na'munali konteynerga ta'sir qilmaydi. Qizdirgich ichida na'muna joylashtiriladigan o'zgarmas (izotermik) temperatura sohasini olish uchun isitgich berilliy oksididan tayyorlangan silindr ekran (15) bilan o'ralgan. Shunday holda isitgich ichida (o'rtasida) uzunligi 25 mm bo'lgan bir jinsli temperatura sohasi hosil bo'ladi. Isitgich suv bilan sovutiladigan va tok ulanadigan mis taglik (20)ga mahkamlangan. Qisqichlarga quvvati 40 kVt bo'lgan Tammon transformatorning ikkinchi o'ramidan tok beriladi. Qizdirgich ichidagi temperatura shu transformatorning birinchi o'ramiga ulangan THH – 40 kuchlanish rostlagichi yordamida o'zgartirildi. Qizdirgichning quvvati uning temperaturasi 1700°C bo'lganda 8 kVt ni tashkil etdi. Temperaturani o'lchashda, volfram – reniy BP – 5 va BP – 20 tarkibli simlardan differensial holda tayyorlangan, 13 – termoparadan foydalanildi.

Termoparaning sovuq kavshari “ Ноль – В “ rusumli termostat ichidagi 0°C sharoitda, issiq kavshari esa na'munali konteyner ostiga undan 2 mm pastda joylashtirildi. Termo EYUK ni qayd etish bir vaqtda BK – 2-20 rusumli elektron voltmetr va ПП – 63 rusumli potensiometri vositasida amalga oshirildi. Tajriba sharoiti uchun termoparani darajalash temirning erish temperaturasi (1540°C) va polimorf o'tishlar temperaturalarini [$\alpha - \gamma$ (910°C), $\gamma - \beta$ (1392°C)]; Buning erish Ni temperaturasi (270°C); ba'zi qattiq eritmalarining Kyuri temperaturalarini [Cu 14 - Ni 86 at % ($2,95^{\circ}\text{C}$), Cu 25,5 - Ni 74,5 % (95°C) va Co 21 – Ni 79 at % (595°C)] hamda Co, Fe va Ni larning Kyuri nuqtalari (Co – 1130°C , Fe – 768°C , Ni – 358.1°C) bo'yicha amalga oshirildi. Namuna temperaturasining termopara termo



2.4 – rasm. Elektromagnit qutblarining gorizonta kesimi.



2.5 – rasm. Kompensatsiya g'altaklaridan o'tayotgan tok kuchi bilan bo'sh tigelning maydondagi holatiga bog'liqligi.

EYUK bilan, shu tartibda aniqlangan, bog'lanishi (darajalash egri chizig'i) 2.3 – rasmda ko'rsatigan.

Elektromagnit. Magnit maydoni hosil qilish uchun ΦII – 1 laboratoriya elektromagnitdan foydalanildi. Unga ST – 2000 rusumli o'zgaruvchan kuchlanish stabilizatori tog'rilagich va filtr bloklari orqali o'zgarmas tok berildi.

Magnit maydoni qiymatini nazorat qilish elektromagnit zanjiriga ketma ket ulangan etalon qarshilikdagi kuchlanish tushishini BK – 2-20 rusumli elektron voltmetr yordamida o'lchash yo'li bilan amalga oshiriladi.

Bir jinsli bo'lmagan magnit maydoni hosil qilish uchun elktromagnit o'zagiga, 2.4 – rasmda vertikal kesimi ko'rsatilgan, maxsus shkaladagi qutblar mahkamlangan. Bunday shkaladagi qutblar orasiga x o'qi bo'ylab 12 mm sohada

$H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right)$ ifodaning qiymati o'zgarmas bo'lib qoldi. O'lchashlarda xuddi mana shu sohaga etalon va na'muna (konteyner) joylashtiriladi. Bunday soha kompensatsiya g'altaklari -7 dan oqadigan (2.2-rasm) tok kuchi J_k qiymati bilan tigeling elktromagnit qutblari orasidagi holati (x koordinatasi) orasidagi bog'lanishi ko'rinishida 2.5 – rasmda keltirilgan.

Vakuum kamerasi. Magnit tarozi va isitgich suv bilan sovitiladigan vakuum kamerasi ichida joylashtirilgan. Kamera quyidagi qismlardan iborat (2.1 – rasm). 1-qalpoq darchali, 3-darchasi organik shisha (ko'zguga tushgan va qaytgan nur o'tadigan) bilan yopilgan bo'lib, u 8 – taglikka asosga mahkamlanadi. Ichidan suv oquvchi 9-sovutgich (emeyevik) taglik ostiga o'ralgan. Kameraning 10 – nay orqali kameradan havo so'rib olinadi, yoki unga geliy gazi kiritiladi. 14 – suv kuylagi, 18 – flanes, 19 – taglik, 17 – qizdirgich va 20 – tok ulagichlar suv yordamida sovutiladi.

Kameradagi vakuum BH – 2 MГ rusumli forvakuum nasosi va vakuum agregat (BA – 01 – 1) yordamida hosil qilinadi. Kamerada vakuum (10^{-4} mm simob ustuni)

hosil qilingandan so'ng, tekshirilayotgan namunaning bug'lanishini oldini olish uchun, unga 0,1 – 0,2 atm ortiqcha bosimidagi spektral jihatdagi sof geliy solinadi.

2.3. Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash xatoliklari.

Tajriba asosida magnit qabul qiluvchanlikni (2.5) ifoda yordamida hisoblanadi. Bu ifoda asosida yo'l qo'yiladigan o'lchash xatoligini topish uchun uni logarifmlash va differensiallashdan so'ng nisbiy xatoni topish uchun quyidagi ifodani topamiz:

$$\frac{\Delta \chi}{\chi} = \left| \frac{\Delta m_{et}}{m_{et}} \right| + \left| \frac{\Delta m_{\chi}}{m_{\chi}} \right| + \left| \frac{\Delta \chi_{et}}{\chi_{et}} \right| + \left| \frac{\Delta U_1}{U_1} \right| + 2 \left| \frac{\Delta U}{U} \right|, \quad (2.7)$$

Bundagi har bir xatolikni baholaymiz : $\left| \frac{\Delta m_{et}}{m_{et}} \right|$ -analitik tarozining tortish aniqligi bilan aniqlanadi va xatolik 0.02 – 0.03 % dan osNMaydi; $\left| \frac{\Delta \chi_{et}}{\chi_{et}} \right|$ -etalonning xona temperaturasidagi magnit qabul qiluvchanligini aniqlanishi darajasiga bog'liq bo'lib, 0,2 % dan osNMaydi;

Etalon qarshilikda kuchlanish tushishini o'lchashdan xatolik “BK 2-20” voltmetrning aniqlik sinfi va kompensatsiya vaqtida shkaladagi shu'la chizig'ini ko'z bilan kuzatishdagi noaniqlik ($\pm 0,2$ mm) bilan bog'liq bo'lib, $\left| \frac{\Delta U_1}{U_1} \right|$, $\left| \frac{\Delta U_{et}}{U_{et}} \right|$, $\left| \frac{\Delta U}{U} \right|$ -larning maksimal qiymati mos ravishda 0,3 %, 0,4 % va 0,6 % dan osNMaydi. Shunday qilib, (2.7) bo'yicha nisbiy xatolik $\left| \frac{\Delta \chi}{\chi} \right|$ 2% dan osNMaydi.

Ikkinchi tomondan quyidagi sabablar ham o'lchash xatoligini oshiradi.

1. Konteynerning har safar elektromagnit qutblari orasidagi, aynan $H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} \right) = const$ bo'lgan sohaga aniq tusNMasligi ($\pm 0,2 \text{ mm}$); Bunda χ ni o'lchashdagi maksimal xatolik 0.1 % dan osNMaydi.
2. Elektromagnit orqali bir xil tok berishdagi xatolik; Bu sabab tufayli xatolik 0.05 % ni tashkil qiladi.
3. Namunalarning yuqori temperaturadagi bug'lanishi; Bu tufayli xatolik 0.3 % dan osNMaydi.
4. Namuna temperaturasini o'lchashdagi xatolik ($\pm 0,5^{\circ} \text{C}$) . Bu tufayli xatolik 0.01 % ni tashkil qiladi.
5. Kuzatuv shkalasidagi sho'la ichidagi vizir chizig'ini kompensatsiya paytida shkalaning no'l holatida joylashganligini ko'z bilan payqashdagi xatolik ($\pm 0.2 \text{ mm}$). Bu tufayli xatolik 0.4 % ni tashkil qiladi.

Shunday qilib, umumiy nisbiy xatolik 2,5 – 3 % dan oshmaydi.

II bobga doir xulosalar.

1. Tadqiqod ob'ektlarining magnit qabul qiluvchanligini o'lchash usulining mohiyati va qurulmasining tuzulishi hamda ish prinsipi bayon qilindi.
2. Magnit qabul qiluvchanlikni yuqori temperaturalarda (qattiq va suyuq holatlarda) o'lchash xatoliklari batafsil tahlil qilinib, nisbiy xatolik 3% dan oshmasligi isbotlandi.

III-BOB. TADQIQOT NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI

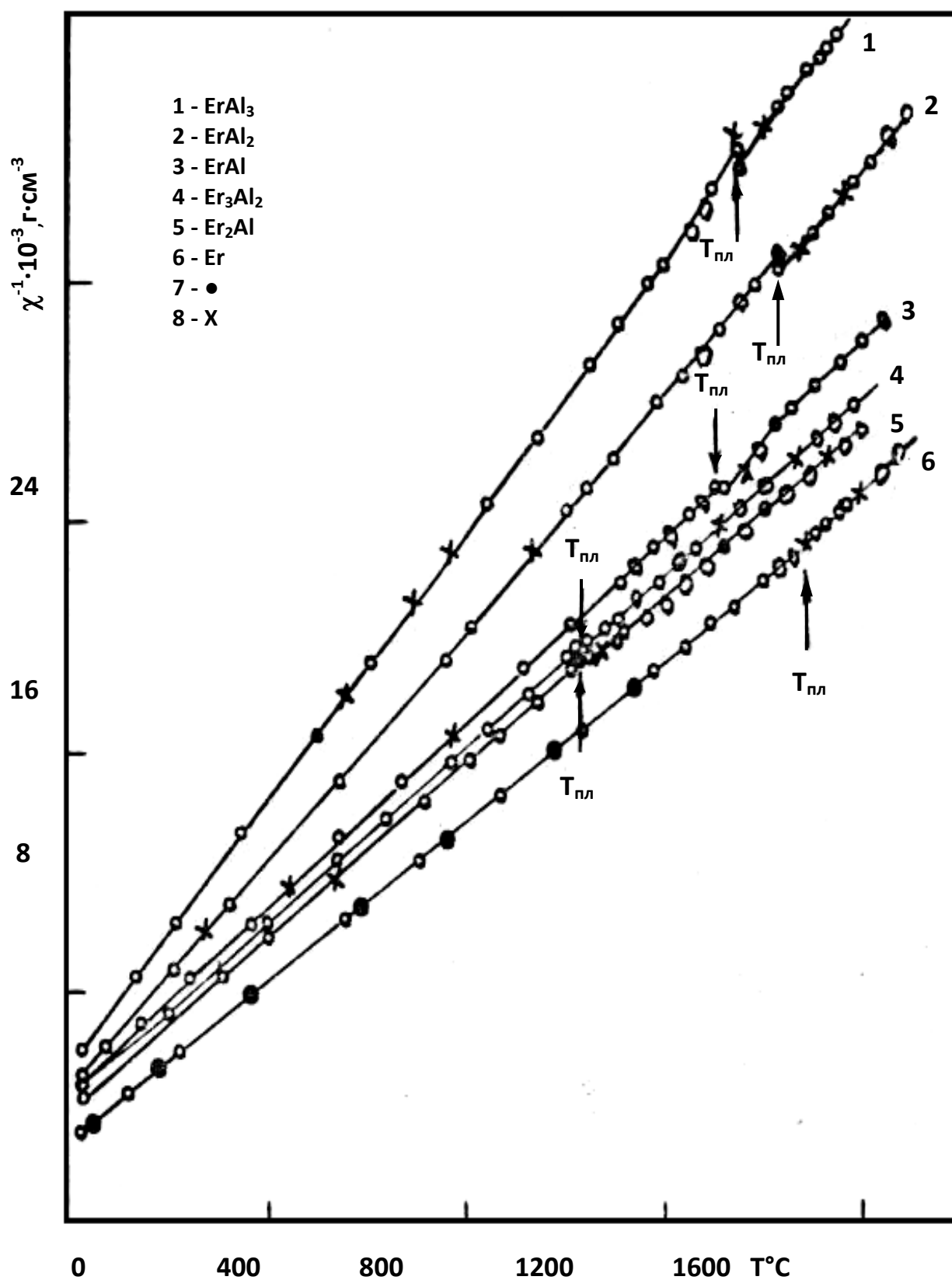
Ushbu bobda Er – NM (NM=Al, Cu, In) sistemalaridagi birikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlarini o'lchash natijalari, ularning muhokamasi va o'lchash natijalaridan foydalanib namunalarning asosiy magnit harakteristikalarini hamda ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirini yarim empirik usulda o'rganish natijalari bayon qilinadi.

3.1. Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemasidagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligini ularning qattiq va suyuq holatlarida o'lchash natijalari va ularning muhokamasi.

3.1.1. Er-Al sistemasi.Toza Er va uning Al bilan hosil qiladigan birikmalarining magnit qabul qiluvchanligini uy temperaturasidan 1700°C gacha tepraturalar oralig'ida, ularning qattiq va suyuq holatlarida, o'lchandi. Birikmalarni sintez qilishda va ularning $\chi(T)$ bog'lanishlarini o'lchashda Er-Al sistemalarinig 1.2 da keltirilgan holat diagrammasidan foydalaniladi (1.2-rasm).

O'lchash natijalari $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida 3.1-rasmda keltirilgan.Shuni alohida qayd etish kerakki, toza Er uchun $\chi(T)$ bog'lanishni o'lchash natijalari [8] ishdagi o'lchash natijalari bilan $\pm 2\%$ aniqlikda mos tushadi. Bu $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarda strelkalar bilan ko'rsatilgan erish tempraturalari Er-Al sistemasi holat diagrammasi(1.2-rasm) bilan yaxshi mos tushadi. 3.1- rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, toza Er va uning Al bilan hosil qiladigan birikmalarining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari ularning qattiq holati uchun ham, suyuq holati uchun ham chiziqli tabiatga ega. Bu tajribaviy dalil o'rganilgan namunalarning tajribaviy $\chi(T)$ bog'lanishlari (1.12) ko'rinishidagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishini tasdiqlaydi. 3.1-rasmdan yana shu narsa ko'rinib turibdiki, o'rganilgan na'munalarning erish

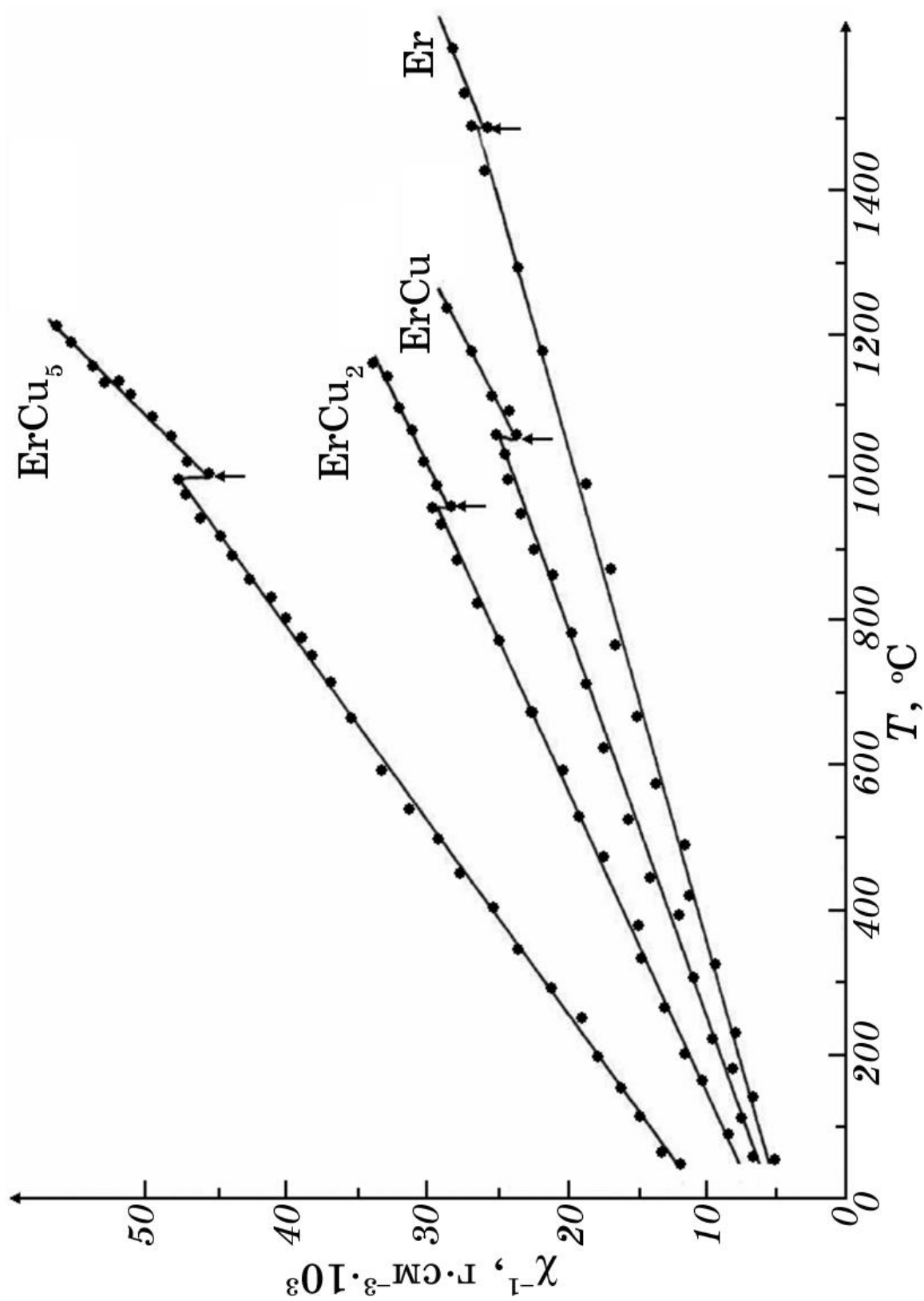
jarayonida ularning magnit qabul qiluvchanligida, aniqrog'i $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida sezilarli o'zgarish yuz bermaydi. Bu o'zgarish Er_2Al , Er_3Al_2 va $ErAl$ birikmalarida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanisning sinishi, $ErAl_2$ va $ErAl_3$ birikmalarida esa kuchsiz sakrashi ko'rinishida aks etadi. Al konsentratsiyasi oshishi bilan bunday o'zgarish χ^{-1} ning kamayishi ko'rinishida (tajriba xatoligi) oshib boradi. Biroq erish jarayonida namunalar magnit qabul qiluvchanligining temperatura koeffitsienti ($d\chi^{-1}/dT$) o'zgaradi.



3.1-rasm. Er-Al sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar: 7-[13] ish natijasi, 8-sovutish jaroyida o'lchangan.

Bu namunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarning temperatura o'qiga nisbatan qiyaligi erish jarayonida o'zgarishi ko'rinishida aks etgan. Boshqacha aytganda namunalarning qattiq va suyuq holatlarining Kyur-Veyss doimiylari bir-biridan farq qiladi. O'rganilgan namunalarning erish jarayonida ularning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarining sezilarli darajada o'zgarmasligi, ularning magnit xossasi o'troqlashgan tabiatga ega ekanligidan dalolat beradi. Aniqroq aytganda, Er-Al sistemasining magnit xossasi uchun javobgar bo'lgan Er^{3+} ionlaridagi 4f-elektronlarning energetik holati 20-1700°C temperatura intervalida (erish jarayonida ham) deyarlik o'zgarmaydi. O'rganilgan namunalarda Er^{3+} ionlarini (magnit xossa nuqtai nazaridan) erkin ionlar deb qarash mumkin. Demak, bu namunalarning $\chi(T)$ bog'lanishlarini, 1.3 da bayon qilingan, Van-Flek nazariyasi bo'yicha ($\chi_0=0$ hol uchun) tushuntirish mumkin.

3.1.2 Er-Cu sistemasi. Bu sistemadagi namunalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari uy tempraturasidan 1600°C gacha tempraturalar oralig'ida ularning qattiq va suyuq holatlarida o'lchandi. Birikmalarni sintez qilishda va ularning $\chi(T)$ bog'lanishlarni o'lchashda Er-Cu sistemasining, 1.2 da keltirilgan, holat diagrammasidan (13-rasm) foydalanildi. O'lchash natijalari $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida, 3.2 rasmda keltirilgan (30) namunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida strelkalar bilan ko'rsatilgan, erish tempraturalari, Er-Cu sistemasining holat diagrammasi (13-rasm) yaxshi mos tushadi. O'lchash natijalarini (3.2-rasm) tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, barcha o'rganilgan natijalar uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar, ularning qattiq va suyuq holatlari uchun chiziqli tabiatiga ega. Bu tajribaviy dalil Er-Cu sistemasi uchun $\chi(T)$



3.2-rasm. Er-Cu sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.

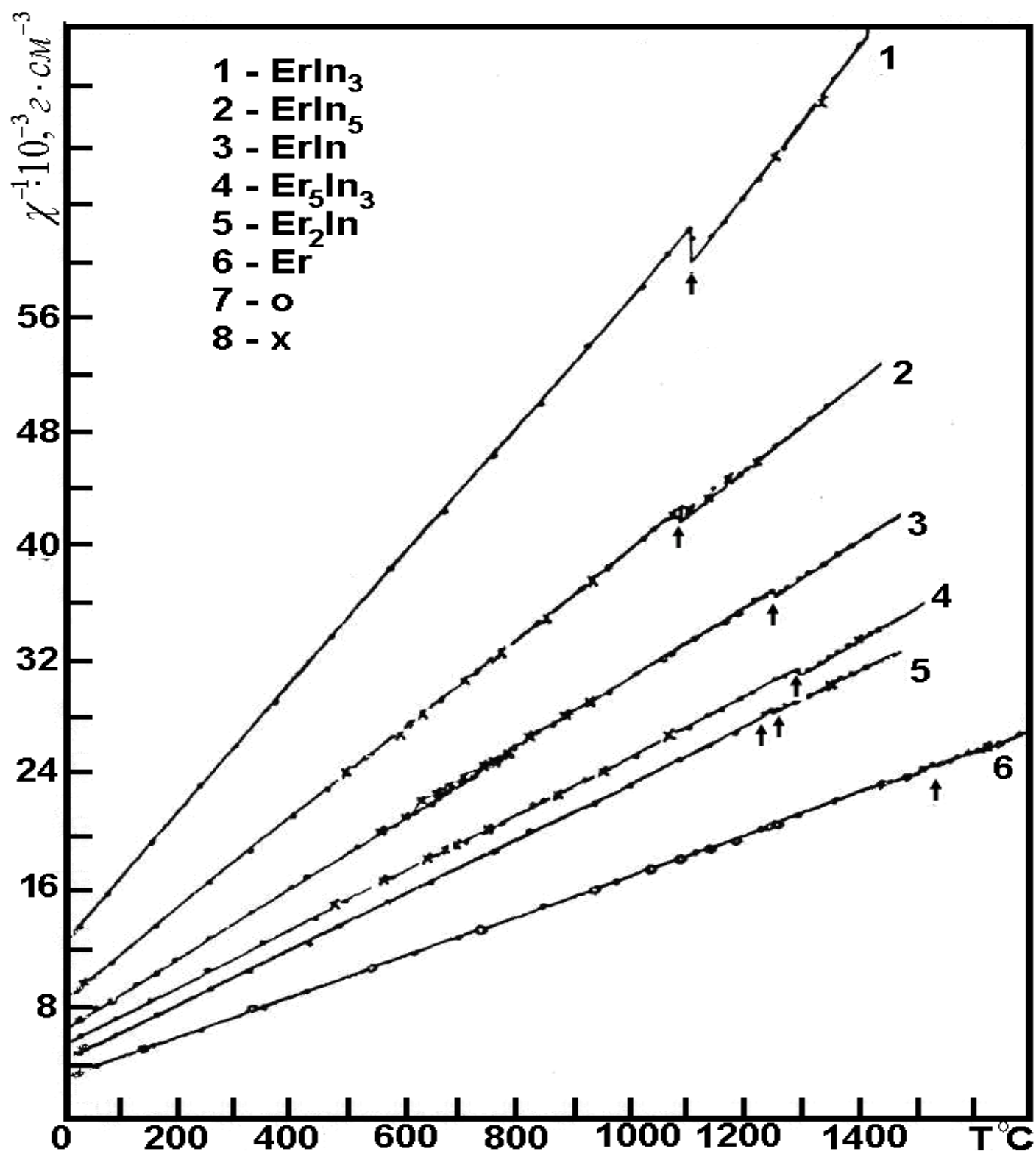
bog'lanish (1.12) ko'rinishidagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysunadi. 3.2-rasmdan yana shu narsa ko'rinib turibdiki, namunalarning erish jarayoni ularning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari tikligini $(d\chi^{-1}/dT)$ kuchsiz sakrash ko'rinishida oshiradi.

Bundan shunday xulosa kelib chiqadiki, Er-Cu sistemasining magnit xossasi uchun javobgar bo'lgan Er^{3+} ionlaridagi 4f-elektronlarining energetik holati, namunalarning erish jarayonida deyarlik o'zgarmaydi. Demak, bu sistema $\chi(T)$ bog'lanishlarini erkin ionlar modeliga asoslangan, Van-Flek nazariyasi (1.3) bo'yicha tushuntirish mumkin.

3.1.3. Er-In sistemasi. Er-In sistemadagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligi 20-1700°C temperaturalar oralig'ida, ularning qattiq va suyuq xolatlarida o'lchanadi. O'rganiladigan birikmalarni sintez qilishda va ularni $\chi(T)$ bog'lanishlarini o'lchashda Er-In sistemasining, 1.2 da keltirilgan (1.4-rasm), xolat diagrammasidan foydalaniladi.

O'lchash natijalari $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida, 3.3-rasmda keltirilgan [31]. Shuni alohida qayd etish kerakki, toza Er uchun $\chi(T)$ bog'lanishni o'lchash natijalari [8]ishdagi o'lchash natijalari bilan $\pm 2\%$ aniqlikda mos tushadi. Namunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida strelkalar bilan ko'rsatilgan erish temperaturalar Er-In sistemasining holat diagrammasi (1.4-rasm) bilan yaxshi mos tushadi. 3.3-rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, Er va uning In bilan birikmalarining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari ularning qattiq holatida ham, suyuq holatida ham chiziqli tabiatga ega. Bu tajribaviy dalil, shu bog'lanishlarning (1.12) ko'rinishdagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishidan dalolat beradi. ErIn birikmasining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishida 600-720°C temperaturalar oralig'ida, (temperaturani 30-40

minut izotermik ushlab turib o'lchashlar olinganiga qaramasdan) issiqlik gisterezisi kuzatildi. Bu hodisani birikma krisstal panjarasida



3.3-rasm. Er-In sistemasining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari: 7-[8] ish natijasi, 8-sovutish jarayonida o'lchangan.

strukturaviy o'zgarish yuz berishi bilan tushuntirish mumkin. Haqiqatdan ham [32] ish mualliflari 900°C da TbIn birikmasi kristal panjarasi tetragonal panjara turidan

yuqori temperaturali kubik panjara turiga polimorf o'tishi yuz berishini aniqlaganlar. Bu yuqoridagi fikrlarning bilvosita isbotidir.

3.3-rasmdan ko'rinib turibdiki, erish jarayoni ErIn , Er_3In_5 va ErIn_3 lardan tashqari, barcha namunalarning $\chi^{-1}(\text{T})$ bog'lanishlarining sinishi ko'rinishida aks etadi. ErIn , Er_3In_5 va ErIn_3 birikmalar uchun erish jarayonida $\chi^{-1}(\text{T})$ bog'lanishlarda kichik sakrash yuz beradi. Bu tajribaviy dalil, Er-In sistemasining magnit xossasiga sababchi bo'lgan, Er^{3+} ionlaridagi 4f-elektronlarning energetik holati erish jarayonida deyarlik o'zgarmaligini ko'rsatadi. Bu esa o'z navbatida Er-In sistemasi paramagnetizmini, Er-(Al, Cu) sistemalari paramagnetizmi kabi, erkin ionlar modeliga asoslangan, Van-Flek nazariyasi ($\chi_0 = 0$ holda) bo'yicha (1.3 da bayon qilingan) tushuntirish mumkinligini tasdiqlaydi.

3.2. Er-(Al,Cu,In) sistemasi birikmalarining asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash.

Er-NM(NM=Al,Cu,IN)sistemalaridagi na'munalarning asosiy magnit xarakteristikalari, ularning 3.1.da bayon qilingan tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan foydalanib aniqlandi. Bu quyidagicha amalga oshirildi.Kyuri – Veyss qonunining (1.12) ko'rinishdagi ifodasiga eng kichik kvadratlar usuli (EKKU) qo'llanildi. Dastlab [28,29] ishlarda bayon qilingan tavsiyalardan foydalanib, (1.12) ifoda quyidagi ko'rinishda yozildi:

$$\chi^{-1} = \frac{T - \theta_p}{C} = \frac{T}{C} - \frac{\theta_p}{C}. \quad (3.1)$$

Bu ifodada $y = \chi^{-1}$, $x = T$, $A = 1/C$, $B = -\frac{\theta_p}{C}$ belgilashlar kiritib, undan quyidagi chiziqli tenglamani olamiz:

$$y = Ax + B. \quad (3.2)$$

Bu tenglamaning A va B koeffisientlarini, EKKU ning normal tenglamalarini yechishdan kelib chiqadigan, quyidagi ifodalar yordamida hisoblanadi:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (3.3)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (3.4)$$

Bu ifodalardagi n – y kattalini x ga bog'liq ravishda o'lchashlar soni, A va B – koeffisientlarni (3.3) va (3.4) ifodalar bo'yicha EHMda hisoblash dasturini tuzish uchun quyidagi algoritm tuzildi.

1. O'lchashlar soni (n) va tajribada o'lchangan x_i va y_i kattaliklar ni mashina xotirasiga kiritish;

2. $\sum_{i=1}^n x_i, \sum_{i=1}^n y_i, \sum_{i=1}^n x_i y_i, \sum_{i=1}^n x_i^2$ yig'indilarni EHMda hisoblash;

3. Ava B koeffisientlarni (3.2) va (3.3) ifodalar bo'yicha hisoblash;

4. Cva θ_p kattaliklarni $C=1/A$ va $\theta_p = -BC$ ifodalar bo'yicha hisoblash;

5. Hisoblangan kattaliklarni EHM xotirasidan chiqarish.

Shu algoritm yordami asosida hisoblash dasturini tuzishdan oldin (3.3) va (3.4) ifodalarda quyidagicha belgilashlar(operatorlar) kiritamiz:

$$xx = \sum_{i=1}^n x_i, \quad yy = \sum_{i=1}^n y_i, \quad xy = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad x2 = \sum_{i=1}^n x_i^2.$$

(3.3) va (3.4) ifodalarni shu operator orqali yozamiz:

$$A = \frac{n \cdot xy - xx \cdot yy}{n \cdot x2 - (xx)^2}, \quad (3.5)$$

$$B = \frac{x2 \cdot yy - xx \cdot xy}{n \cdot x2 - (xx)^2}. \quad (3.6)$$

Yuqoridagi algoritm yordamida Turbo Paskal tilida tuzilgan hisoblash dasturi ushbu bob oxirida ilova qilingan.

Hisoblab topilgan Kyuri – Veyss doimiysining(C) qiymatidan foydalanib, toza erbiyning bitta atomiga to'g'ri keluvchi effektiv magnit momentini (μ_{eff}), va birikmada bitta Er atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) hisoblandi.

Toza erbiy uchun μ_{eff} (1.11), ya'ni quyidagi ifoda bo'yicha hisoblanadi:

$$\mu_{eff} = 2.83 \sqrt{CM} \mu_B, \quad (3.7)$$

Bu yerda M – erbiyning atomar massasi.

Binar birikma komponentalari magnit va nomagnit atomlardan tashkil topganda bitta magnit komponenta atomiga to'g'ri keladigan magnit momentni hisoblash maqsadga muvofiqdir[33]. O'rganilgan birikmalarda magnit komponentaerbiy bo'lganligi uchun, uning atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment ifodasi quyidagi mulohaza bo'yicha aniqlandi: additivlik qoidasi bo'yicha va erbiy metalli magnit qabul qiluvchanligi birikmaning tajribada aniqlanadigan magnit qabul qiluvchanligining (x) $(100-x)/100$ qismiga to'g'ri kelishini hisobga olib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M_C = \frac{M_1(100 - x) + M_2 x}{100} \cdot \frac{100}{100 - x} C = \left(M_1 + \frac{xM_2}{100 - x} \right) C, \quad (3.8)$$

bu yerda M_1 va M_2 – mos ravishda erbiy va NM (NM=Al,Cu,In)larning atomar massalari; x - NMning) birikmadagi at. % dagi konsentratsiyasi. (3.7) va (3.8) ifodalardan izlayotgan ifodani olamiz:

$$\mu_{eff} = 2.83 \sqrt{C \left(M_1 + \frac{xM_2}{100 - x} \right)} \cdot \mu_B. \quad (3.9)$$

O'rganilgan Er – (Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalarning asosiy magnit xarakteristikalarini hisoblash natijalari 3.1 – jadvalda keltirilgan.

3.1-jadvalni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, barcha o'rganilgan sistemalarda erbiyga NM qo'shilishi bilan θ_p kamayadi. O'rganilgan namunalar suyuq holatining θ_p si qattiq holatining θ_p si dan katta. Er_3Al_2 , $ErCu$, Er_3In_5 va $ErIn_3$ birikmalar qattiq holatda manfiy θ_p ga ega bo'ladilar. Bu ularning antiferromagnit tartiblanishga ega bo'lishidan dalolat beradi.

Erbiy va o'rganilgan barcha birikmalarning qattiq holatida ham, suyuq holatida ham bitta erbiy atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentlarning(μ_{eff}) qiymatlari erkin Er^{3+} ionining magnit momenti qiymatiga ($9,59\mu_B$, 1.2-jadval)

3.1-jadval

Er-NM (NM=Al,Cu,In) sisemalaridagi inter metallidlarning asosiy magnit xarakteristiklari

Birikma	Qattiqholat			Suyuqholat		
	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2}, \text{sm}^3 \cdot K \cdot g^{-1}$	μ_{eff}, μ_B	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2}, \text{sm}^3 \cdot K \cdot g^{-1}$	μ_{eff}, μ_B
Er	58	7,04	9,71	110	6,76	9,51
Er ₂ Al	52	6,38	9,61	98	6,20	9,47
Er ₃ Al ₂	-14	6,11	9,52	96	5,97	9,41
ErAl	19	6,02	9,68	95	5,62	9,35
ErAl ₂	3	5,09	9,50	112	4,77	9,19
ErAl ₃	6	4,53	9,49	174	4,09	9,02
ErCu	-17	5,14	9,74	448	3,64	8,2
ErCu ₂	8	3,94	9,64	53	3,38	8,92
ErCu ₅	≈0	2,54	9,93	403	1,86	8,47
Er ₂ In	52	5,13	9,61	98	4,98	9,47
Er ₅ In ₃	23	4,89	9,63	160	4,47	9,20
α -ErIn	5	4,04	9,56			
β -ErIn	-19	4,15	9,68	95	3,87	9,35
Er ₃ In ₅	-3	3,14	9,50	80	3,04	9,35
ErIn ₃	-6	2,20	9,49	174	1,99	9,02

yaqin. Bu tajribaviy dalil, o'rganilgan namunlarning magnit xossasiga sababchi bo'lgan 4f-elektronlarning energetik holati, Er^{3+} ionining asosiy energetik holatiga ($^4\text{I}_{15/2}$) yaqin bo'ladi. Nomagnit metallar (Al,Cu,In) muhiti va yuqoro tempratura (yoki erish jarayoni) bu holatga deyarlik ta'sir qilmaydi.

3.3. Er-(Al,Cu,In) sistemasida amal qiluvchi almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish.

1.3 da aytilganidek, KEMning magnit xossasini, kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan 4f-elektronlar hosil qiladi. 1.1 da aytilganidek, 4f-elektronlar kristall panjara tugunlarida $5s^2 5p^6$ elektronlar bilan kristall panjara maydonidan himoyalangan bo'ladi. KEMda magnit tartiblangan holatni 4f-elektronlarning, panjara tugunlari orasida erkin harakatlanuvchi, $5d^1$ va $6s^2$ elektronlar orqali o'zaro ta'siri hosil qiladi. Bunday o'zaro ta'sirga bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir deyiladi. Bunday o'zaro ta'sirining energetik o'lchovi vazifasini o'rganilgan Er-(Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalarning paramagnit Kyuri temperaturasi θ_p (1.4 da qayd etilganidek) bajaradi. θ_p va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri (yoki integrali) A orasida, 1.4da keltirilgan, (1.24) bog'lanish, ya'ni quyidagi bog'lanish mavjud:

$$\theta_p = \frac{AG}{3k_B} \quad (3.1)$$

Bu ifodadan quydagini olamiz:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G} \quad (3.2)$$

Bu ifodadagi de Jen faktori G quyidagicha aniqlanadi:

$$G = (g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (3.3)$$

Bundagi Lande fanktori g_J quyidagicha aniqlanadi.

$$g_J = 1 + \frac{[J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)]}{2J(J+1)} \quad (3.4)$$

Bundan L , S va J - 4f-elektronlarning, Xund qoidalari bo'yicha aniqlanadigan, to'la orbital, to'la spin va to'la mexanik moment kvant sonlari.

Toza Erda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir uchun (3.2) ifoda quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G_{Er}} \quad (3.5)$$

Bundagi G_{Er} –Er uchun de Jen faktori bo'lib quyidagi ifoda yordamida hisoblanadi:

$$G_{Er} = (g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (3.6)$$

Er-NM (NM=Al,Cu,In) sistemalaridagi birikmalar uchun (3.2) ifodadagi de Jen faktorini, additivlik qoidasiga asosan, quyidagi ifoda yordamida hisoblash mumkin:

$$G = (1-\delta) G_{Er} + \delta G_{NM} \quad (3.7)$$

Bundagi δ -NMning atom ulushlaridagi konsentratsiyasi, G_{NM} – nomagnit metallar (Al,Cu,In) uchun de Jen faktori, ya'ni

$$G_{NM} = (g_J - 1)^2 J(J+1). \quad (3.8)$$

Er^{3+} - ioni uchun asosiy va birinchi uyg'ongan energetik holatlar energiyalarining farqi - ΔE issiqlik energiyasi- $k_B T$ dan ancha katta (1.1). Shuning uchun ham (3.6) bo'yicha G_{Er} – ni hisoblashda Er^{3+} ionining asosiy energetik holati uchun Lande faktori va J ning qiymatlaridan foydalanish mumkin: $g_J = 6/5$ va $J = 15/2$. Al^{3+} , Cu^{1+} va In^{3+} ionlarning asosiy energetik holat terimi 1S_0 bo'lgani uchun (3.8) ifodaga asosan $G_{NM} = 0$ bo'ladi. Buniva (3.7)ni hisobga olib (3.2)dan o'rganilayotgan birikmalardagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash uchun quyidagini olamiz:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x) G_{Er}}. \quad (3.9)$$

Bu ifodadan o'z navbatida quyidagini olamiz:

$$\theta_p = \frac{A}{3k_B}(1-\delta)(g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (3.10)$$

Shunday qilib,(3.1) va(3.10) ifodalarni tahlil qilib toza KEM, xususan Er va uning nomagnit metallari bilan ekviatom tarkibli birikmalarining paramagnit Kyuri temperaturasi de Jen faktori orasida chiziqli proporsionallik mavjud degan xulosaga kelish mumkin. Bu RKKI nazariyasining xulosalaridir.

(3.2) va (3.9) bo'yicha A/k_B parametrini hisoblash natijalari 3.2 – jadvalda keltirilgan.3.2-jadvalni tahlil qilib quyidagilarni aytish mumkin: Er-Al va Er-Cu sistemalarida A/k_B parametrlarining qiymati Al atomi konsentratsiyasining oshishi bilan, biron-bir qonuniyatga bo'ysinmagan holda o'zgaradi. Bu parametrning qiymati namunalar qattiq holatdan suyuq holatga o'tganda oshadi.

Er-In sistemasida A/k_B parametrning qiymati birikmalarning qattiq holatida indiy konsentratsiyasining oshishi bilan dastlab oshadi (Er_2In_4), so'ngra kamayadi;Indiyning konsentratsiyasi 55 at.%dan ortiq bo'lgan birikmalarda($Er_3In_5, ErIn_3$) A/k_B ning ishorasi musbatdan manfiyga o'zgaradi va indiy konsentratsiyasi oshishi bilan yana kamayadi. Suyuq holat uchun ham taxminan shunday qonuniyat kuzatiladi.Bu sistemada ham namunalarqattiq holatdan suyuq holatga o'tganda A/k_B ning qiymati oshadi.

1.4dan malumki, A parametrning kattaligi va ishorasi Ruderman-Kittel funksiyasi $F(x)$ ning magnit ionlar orasidagi masofaga($|\vec{R}_n - \vec{R}_m|$) bog'liqligi bilananiqlanadi. A-parametr ishorasining o'zgarishi $F(x)$ funksiyaning osillatsion xarakteri, yani uning ishorasining o'zgarishi bilan bog'liq. KEM – In sistemasidagi birikmalar kristall panjarasining davrlari toza KEMnikidan katta ekanligi [34]

3.2-jadval

Er-(Al,Cu,In) sistemalarida amal qiladigan bil vosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrining qiymatlari

Birikma	θ_p , K		A/k_B , K	
	Qattiq holat	Suyuq holat	Qattiq holat	Suyuq holat
Er	58	110	62,8	129,4
Er ₂ Al	52	98	91,7	172,8
Er ₃ Al	-14	96	-27,4	188,2
Er Al	19	95	44,7	223,4
Er Al ₂	3	112	10,7	399,1
Er Al ₃	6	174	28,2	818,5
Er Cu	-17	448	-40	1054
Er Cu ₂	8	53	28,6	189,3
Er Cu ₅	≈ 0	403	≈ 0	2812
Er ₂ In	52	98	91,2	171,9
Er ₅ In ₃	23	160	43,4	301,9
α -Er In	5	95	11,7	222,6
Er ₃ In ₅	-3	80	-9,4	250
Er In ₃	-6	174	-28,1	815,6

ishda aniqlangan. Demak Er kristall panjarasida diamagnit matritsa- In^{3+} ionlari joylashganda magnit matritsa Er^{3+} ionlari orasidagi masofa oshadi. Bu o'z navbatida In konsentratsiyasi oshishi bilan A parametrining kamayishiga olib keladi. Shunday qilib, o'rganilgan sistemalarda, toza Er dagidek, RKKI turdagi almanishinuv o'zaro ta'siri amal qiladi deyishimiz mumkin.

III bobga doir xulosalar

1. Toza Er va uning Al,Cu va In bilan hosil qiladigan birikmalarining $\chi(T)$ bog'lanishlari ularning qattiq va suyuq holatlarida 20-1700°C temperaturalar oralig'ida o'lchandi. Bu bog'lanishlar namunalarning qattiq holati uchun ham, suyuq holati uchun ham Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi ko'rsatildi. Er-Al sistemasidagi barcha birikmalarning, Er-In sistemasidagi Er_2In va Er_5In birikmalarning erishida bu bog'lanishning sinib o'zgarishi, qolgan birikmalarning erishida esa kuchsiz sakrash bilan o'zgarishi kuzatildi. Bu tajribaviy dalil o'rganilgan namunalarning magnit xossasini hosil qiluvchi 4f-elektronlarning energetik holati ularning erish jarayonida o'zgarmasligidan dalolat beradi.
2. O'rganilgan namunalarning tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan foydalanib, ularning qattiq va suyuq holatining asosiy magnit xarakteristikalarini - paramagnet Kyuri temperaturasi(θ_p), Kyuri-Veyss doimiysi(C) va bitta Er atomiga to'g'rikeldigan effektiv magnit moment(μ_{eff}) hisoblandi. Hisoblash natijalaridan kelib chiqib namunalarning paramagnet holati paramagnetizmning Ven-Flek nazariyasi bo'yicha tushuntirildi.
3. O'rganilgan namunalarning paramagnet Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro tasir doimiysi (parametri) empirik usulda hisoblandi. Hisoblash natijalariga tayanib, namunalarda RKKI turdagi o'zaro tasir, ya'ni 4f-elektronlarning panjara tugunlari orsida umumlashgan elektronlar orqali o'zaro ta'siri ularning magnit xossasini hosil qilishligi ko'rsatildi.

XULOSALAR

1. Toza Er va uning nomagnit metallar Al, Cu va In bilan birikmalari magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishi [$\chi(T)$] 20-1700°C temperaturalar oralig'ida, qattiq va suyuq holatlarda birinchi marta o'rganildi.
2. O'rganilgan barcha namunalarning $\chi(T)$ bog'nishilari, ularning qattiq holatida ham, suyuq holatida ham Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlandi. ErIn birikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishida 600-720°C temperaturalar oralig'ida issiqlik gisterezisi kuzatildi. Bu polimorf fazoviy o'tish bilan bog'lab tushuntirildi.
3. Toza Er va o'rganilgan birikmalarning erish jarayoni ularning $\chi(T)$ bog'lanishiga sezilarli ta'sir ko'rsatmasligi aniqlandi. Er-Al sistemasidagi barcha birikmalarning, Er-In sistemasidagi Er_2In va Er_5In birikmalarning erishida bu bog'lanishning sinib o'zgarishi, qolgan birikmalarning erishida esa kuchsiz sakrash bilan o'zgarishi kuzatildi. Bu tajribaviy dalil o'rganilgan namunalarning magnit xossasini hosil qiluvchi 4f-elektronlarning energetik holati ularning erish jarayonida o'zgarishidan dalolat beradi.
4. O'rganilgan namunalarning tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan foydalanib, ularning qattiq va suyuq holatining asosiy magnit xarakteristikolari - paramagnet Kyuri temperaturasi (θ_p), Kyuri-Veyss doimiysi (C) va bitta Er atomiga to'g'rikeldigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) hisoblandi. Hisoblash natijalaridan kelib chiqib namunalarning paramagnet holati paramagnetizmning Ven-Flek nazariyasi bo'yicha tushuntirildi.
5. O'rganilgan namunalarning paramagnet Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro tasir doimiysi (parametri) empirik usulda hisoblandi. Hisoblash natijalariga tayanib, namunalarda RKKI turdagi o'zaro tasir, ya'ni 4f-elektronlarning panjara tugunlari orsida umumlashgan elektronlar orqali o'zaro ta'siri ularning magnit xossasini hosil qilishligi ko'rsatildi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Вонсовский С.В. «Магнетизм». – М.: Наука, 1971 – 1032с,
2. Тейлор К. , Дарби М. «Физика редкоземельных соединений». – М.: Мир, 1974 – 374с.
3. Белов К.П. , Велянчикова М. «Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики». – М.: Наука, 1985 – 320с.
4. Тейлор К. Интерметаллических соединений редкоземельных металлов. – М.: Мир, 1974 – 374с.
5. Аражис С. , Колвин Р. Парамагнитная восприимчивость редкоземельных металлов при повышенных температурах. В.Сб.: «Новые исследования редкоземельных металлов». – М.: Мир, 1984. с.100-135.
6. Кондон Е. , Шортли Г. «Теория атомных спектров». – М.: И.Л. 1949, с. 189-191.
7. Эллиот Р.П. Структуры двойных сплавов. Т.1. – М.: «Металлургия», 1970.– 455 с.
8. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двайных металлических систем. М.:«Машиностроение», 1997, Т.2, с. 1024.
9. Yatsenko S.P., Semyanikov S.S., Shakarov A.O., Fedorova E.G. Phase diagrams of binary rare larth metal-indium systems//J.Less-Conm. Metals.– 1983.– v.90.– №1.– pp.95-108.
10. Van Flack J.H. The theory of electric and magnetic suscetibilities. – Oxford: Univ. pess, 1932 – 384p.
11. Сельвуд П.И. Магнетохимия. – М.: И.Л. 1958 – 460с.
12. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 367 с.
13. Arajs S., Miller D.S. Magnetic Behavior of Polyorystalline neodymium, holmium and erbium from 300 to 1500⁰K//J.Appl.Phys.– 1960.– Vol.31.– N5.– pp.325S-326S.

14. Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллидов в системе Er-
In при высоких температурах // Известия ВУЗов. Россия, Физика. 2004. –
№12. – с.7-10.
15. Buschov K.H.J. Intermetallic compound of Rare Earths and non-magnetic
metals // – Rep. Progres Phys. – 1979. – vol. 42. – 8. – pp.1373-1405.
16. Becll Ch., Lemaire R. Properties magnetiques et Structures magnetiques des
composes coviatomiques de myre DyAl Entre L'aluminium et les metaux de
terres rares. // Proc. Roy. Soc. – 1934. – A144. – 225.
17. Leon B., Rao S.V. and Wallace W.E. Magnetic characteristics of the
aluminium – rich ternary Laves phases contaliming rare earths, nickel and
aliminium // J. Less. Comm. Met. – 1971. – 24. – pp.247-251.
18. Nereson N., Olsen C. and Arnold G. Magnetic properties of Dy Al₂ and Nd Al₂
// J. Appl. Phys. – 1966. – 37. – №12. – pp.4575-4580.
19. Упорова Н.С., Упоров С.А. Сидоров В.Е.
Магнитная восприимчивость параметров электронной структуры интерметал
лических соединений Al₂PЗМ(Gd, Dy и Ho) при высоких температурах //
Известия вузов. Физика. – 2011, №3, сс. 99-103.
20. Buschow K.H.J. deWijn H.W., Van Diepen A.M. Magnetic susceptibilities of
Rare-Earth Indium compounds: RIn₃ // J. Chem. Phys. – 1969. – vol. 50. – №1. –
pp.137-141.
21. Gamari-Seale H., Anagnostopouls T., Vakinthos J.K. Magnetic characteristics
of Rare-Earth-Indium R₂In (R=Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er and Tm) //
J. Appl. Phys. – 1979. – vol. 50. – №1. – pp.434-437.
22. Чечерников В.И. Магнитные измерения. – М.: Изд-во МГУ. – 1969. – 388 с.
23. Вертман А.А. Смарин А.Н. «Измерение магнитной восприимчивости
жидких металлов». // Завдск. лаб. 1958, с. 309-310.
24. Кувондигов О.К., Шакаров Х.О. Методы измерения некоторых
физических величин в общем курсе физики. // Руководство для НИРС и
УИРС. – Самарканд. Изд. СамГУ, 1984. – 45 с.

- 25.Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллических соединений лантаноидов с индием при высоких температурах.// Кандидатская диссертация, Самарканд, 1983.
- 26.Кувондигов О.К., Шакаров Х.О., Иргашев К.М. Высокотемпературная установка для измерения магнитной восприимчивости 3d и 4f – металлов в твердом и жидком состояниях.// В.Сб. : Оптикоакустические, электрические, магнитные исследования конденсированных сред. – Самарканд, Изд. СамГУ, 1982. – с.122-130.
- 27.Kuvondikov O.K., Shakarov X.O., Shodiyev Z.M., Rustamov A. Analysis of the magnetic properties of $(La_{1-x}Sr_x)_{0.93}K_xMnO_3$ manganites at high temperatures.// Journal of communications technology and electronics. 2007, vol. 52, No.9. – p. 1058-1061.
- 28.Шакаров Х.О., Усмонов Б.Н. Применение микро ЭВМ в НИРС по физике. Методические рекомендации. Самарканд, Изд. СамГПИ, 1959. – 37с.
- 29.Shakarov X.O. “Fizikadan laboratoriya mashg`ulotlarida kompyuterdan foydalanish.// Uzluksiz ta`lim tizimida yangi pedagogikva informatsion texnologiyalar” mavzusidagi ilmiy – amaliy konferensiya materiallari, 2 – qism, Samarqand, 2003, 13 – 14 may, 109-111b.
- 30.О.К. Кувандиков, З.М. Шодиев, Б.У.Амонов, А.Абдурахмонов. Изучение магнитных свойства интерметаллидов в системе Ег-Си в твёрдом и жидком состоянии. Металлофизика и новейшие технологии. Украина(г. Киев), 2013, Т. 35, №6, СС.743-749.
- 31.О.К. Кувандиков, Х.О. Шакаров, А. Абдурахмонов. Исследование магнитных свойства интерметаллидов в системе РЗМ- In в твёрдом и жидком состояниях. – Металлофизика и новейшие технологии. Украина(г. Киев), 2013, Т. 35, №7, сс.879-888.

32. Lethuillier P., Percheron-Gougan A. Crystallographic and Magnetic Properties of the Compounds (Gd, Tb, Dy, Ho) In.//J.Less-Common Metals, –1976.–Vol. 46. –pp. 85-89.
33. Антропов В. А., Радовский Н. З., Довгополь С. П., Гельд П. В. Магнитная восприимчивость никель – кремневых сплавов при высоких температурах.//УФЖ.– 1976.–№3.– с.360-364.
34. Yatsenko S.P., Semyanikov S.S., Shakarov A.O., Fedorova E.G. Phase diagrams of binary rare earth metal-indium systems//J.Less-Comm. Metals.– 1983.– v.90.– №1.–pp.95-108.
35. www.ziyonet.uz
36. www.lex.uz
37. www.edu.com
38. www.library.uz