

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

**ALISHER NAVOIY NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

Qo‘lyozma huquqida

UDK538.214.538.222

ISMOILOV HASAN KARIMOVICH

**Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemasidagi intermetallik birikmalarning
magnit xossalarini kondensrlangan holatda yuqori tempraturalarda o‘rganish**

**Mutaxassislik: 5A1040204 – “KONDENSRLANGAN MUHITLAR FIZIKASI
VA MATERIALSHUNOSLIK”**

**MAGISTR
AKADEMIK DARAJASINI Olish uchun yozilgan**

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

Ilmiy rahbar: dots. ShkarovX.O.

SAMARQAND – 2014

Mundarija

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

I.BOB. ADABIYOTLAR SHARHI

1.1.Kamyob Yer metallarining(KEM) va temir guruhi metallarining(TGM) elektron tuzilishi.....	9
1.2. Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemalarining holat diagrammasi.....	16
1.3. KEM va TGM uchun paramagnetizmning Van-flek nazariyasi.....	20
1.4. Bilvosita o'zaro almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi.....	26
1.5. KEMning TGM bilan birikmalarining yuqoro temperaturalardagi magnit xossalari.....	29
1.6. Tadqiqot muammosining qo'yilishi.....	33
I bobga doir xulosalar	34

II.BOB. TADQIQOT USULI VA QURILMASI

2.1. Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash usuli.....	35
2.2. Yuqori temperaturalarda magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash qurilmasining tuzilishi va ish prinsipi.....	38
2.3. Magnit qabul qiluvchanlikni o'lchash xatoliklari.....	47
II bobga doir xulosalar.....	48

III-Bob. TADQIQOT NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI

3.1 Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemasidagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligini kodensrlangan holatda o'lchash natijalari va ularning muhokamasi.....	49
3.1.1. Gd-Fe sistemi	49
3.1.2. Gd-Co sistemi.....	52
3.1.3. Gd-Ni sistemi.....	55
3.2. Gd-TGM sistemi birikmalarining asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash.....	57
3.3. Gd-TGM sistemasida amal qiluvchi almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usilda o'rganish.....	63
III bobga doir xulosa.....	71
XULOSALAR.....	74
FOYDALNILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	76

KIRISH

Mavzuning asoslanishi va dolzarbligi. Bugungi kunda kamyob Yer metallari(KEM), temir guruhi metallari (TGM) va ular orasida hosil bo'ladigan 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 materiallarda kechikib to'ladigan 4f va 3d – elektron qobiqlarning 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 materiallarning fizik xossalarini o'rganish ilmiy jihatdan ham ahamiyatlidir. Chunki, bu materiallardagi almashinuv o'zaro ta'sir tabiati hali to'la aniqlanmagan. Ularning o'ziga xos magnit xossalarini 4f va 3d- 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, TGM va KEM orasidagi 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 adabiyotlarda bugungi kunda 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 (3d-, 4f-, va h.z.) materiallarning 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 $\chi(T)$ bu materiallarning kristall panjarasida yuz beradigan strukturaviy, allotropik va magnit fazoviy o'tishlarni ham sezadigan fizik xossa hisoblanadi.

Tadqiqotning ob'ekti-Gd-TGM(TGM=Fe, Co, Ni) sistemalarida hosil bo'ladigan intermetallik brikmalar.

Tadqiqotning predmeti- Gd-TGM(TGM=Fe, Co, Ni) sistemalaridagi intermetallik brikmalar paramagnet qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishi va shu ob'ektlarda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'siri hisoblanadi.

Tadqiqot usuli- paramagnet qabul qiluvchanlikni tajribada ulchashning Farade usuli va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirini o'rganishning yarim emperik usuli.

Tadqiqotning maqsadi- ushbu magistrlik dissertatsiyada gadoliniy va uning TGM (TGM=Fe,Co,Ni) bilan hosil qiladigan birikmalarining magnit xossalari, ularning kondensirlangan(qattiq va suyuq) holatida yuqori temperaturalar sohasida o'rganish hisoblanadi.

Tadqiqotning vazifalari-quyilgan maqsadni amalga oshirish uchun quyidagi vazifalarni bajarish hisoblandi:

1. Gd - TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemalaridagi birikmalarni sintez qilish;
2. Bu birikmalarning magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishlarini $[\chi(T)]$ ularni 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 Gd atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentni (μ_{eff}) aniqlash;

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

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

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

Tadqiqotning nazariy va amaliy ahamiyati. Ushbu ishda olingan natijalar TGMning KEM bilan hosil qiladigan birikmalarning paramagnit holati va ularda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sir tabiatiga oid nazariyalarini yuqori temperaturalarda takomillashtirishga va ulardan yangi magnit materiallari yaratishga xizmat qiladi.

Himoya qilinadi: 1. TGMning KEM bilan birikmalarining $\chi(T)$ bog'lanishini ularning qattiq va suyuq holatida o'lchash natijalari va o'lchash natijalarini tushuntirish bo'yicha olingan natijalar

2. TGM-(Fe,Co,Ni) sistemalaridagi birikmalarning tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan foydalanib ularning asosiy paramagnit xarakteristikalarini (θ_p , C , μ_f , μ_{eff}) hisoblash natijalari.

3. TGM-(Fe,Co,Ni) sistemalaridagi birikmalarda amal qiladigan bil vosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlarini yari empirik usulda hisplash natijalari.

Ishning tuzilishi va hajmi. Magistrlik dissertatsiyasi bitiruv ishi kirish, uchta bob, xulosalar va 47 ta nomdagi adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan bo'lib, 80 bet lotin alifbosida, bosma shaklda bayon qilingan. Uning mazmuni 16 ta rasm va 8 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 tuzilishi va hajmi bayon qilingan.

Birinchi bobda dissertatsiya mavzusiga oid, bugungi kungacha adabiyotlarda mavjud bo'lgan nazariy va tajribaviy ishlarga(KEM va TGMning elektron tuzilishi, Gd-TGM(TGM=Fe,Co, Ni) sistemalarining holat diagrammasi, KEM va TGM uchun paramagnitizmning Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari hamda Gd-TGM sistemasidagi namunalarning magnit xossalarini yuqori temperaturalarda tajribada 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 temperturalarda ulchash usuli va qurilmasi batafsil bayon qilingan; ulchash xatoligi asoslangan. Bobning oxirida tegishli xulosalar qilingan.

Uchunchi bobda Gd-TGM(TGM=Fe, Co, Ni) sistemalaridagi namunalarning $\chi(T)$ -bog'lanishlarini, ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan, yuqori temperaturalar oralig'ida (20-1800⁰C) o'lchash natijalari bayon qilingan, tahlil qilingan va nazariy jixatdan tushuntirilgan. Ulchash natijalaridan foydalanib tadqiqot namunalarining asosiy magnit xarakteristikalarini paramagnit Kyuri temperaturasi(Θ_p), Kyuri-Veyss doymiy(C) va bitta Gd atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) aniqlangan.

Namunalarning paramagnet Kyuri temperaturasiining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qiladigan, bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirining parametrlari hisoblangan. Hisoblash natijalari tushuntirilgan.

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) va temir guruhi metallarining(TGM) elektron tuzilishi

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

KEM da elektronlarning qobiqlar boʻyicha joylashishi, 4f,5d va 6s-qobiqlarni hisobga olmaganda xuddi ksenondagidek boʻladi. KEM atomlarida 4f-gacha boʻlgan ichki qobiqlar elektronlar bilan toʻlgan boʻlib, ularning elektron konfiguratsiyasi:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10},$$

tashqi elektron qobiqlar konfiguratsiyasi esa:

$$4f^n 5s^2 5p^6 5d^{0-1} 6s^2$$

kabi aniqlanadi [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 esa kristalda umumlashgan, yaʼni elektr tok hosil qiladigan elektronlarga aylanadi. Bu metallar 4f-qobigʻining effektiv radiusi (r_{4f}) kristall panjara tugunlari orasidagi eng qisqa masofa – a panjara davridan ancha kichikdir, yaʼni, $r_{4f} \gg a/2$. Ulardagi 4f-qobigʻidagi elektronlar kristall panjara tugunida oʻtroqlashgan boʻlib, tashqi $5s^2 5p^6$ -toʻlgan qobiqlar bilan 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 ”ion” modelining oʻziga xos tomoni shundaki,

birinchidan, 4f-elektronning tugunlararo bevosita taʼsiri (f-f) mavjud emas deb qaraladi; ikkinchidan esa, tugunlardagi 4f-elektronlar orasida spin-orbital ($\vec{L} * \vec{S}$) oʻzaro taʼsir deb ataladigan taʼsir kuchli boʻlib, bunda 4f-elektronning S-spin va L-orbital momentlari Russel-Saunders tipida qoʻshilib, ionning toʻla mexanik momenti - J Xundning uchinchi qoidasiga asosan topiladi: 4f-qobiq yarmigacha toʻlganda (yengil KEM uchun) $J=L-S$, yarmidan ortigʻiga boʻlganda (ogʻir KEM uchun) $J=L+S$ kabi topiladi.

Spin-orbital bogʻlanish energiyasi 4f-elektronlarning birinchi uygʻongan va asosiy holat energiyalarining farqi orqali aniqlanadi. KEM ionlaridagi eng past energiya sathlarining joylashish tartibi bu elementlarning magnit xossalarini belgilaydi. Energetik sathlar haqidagi malumotlar esa fluorestent va infraqizil nuqtalarning optik yutilish spektridan tajribada aniqlanadi. Nazariy jihatdan energetik sathlar sxemasi Gaudsmit [5] va Landening intervallar qoidasi [6] yordamida aniqlanadi. Gaudsmit qoidasi quyidagicha:

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

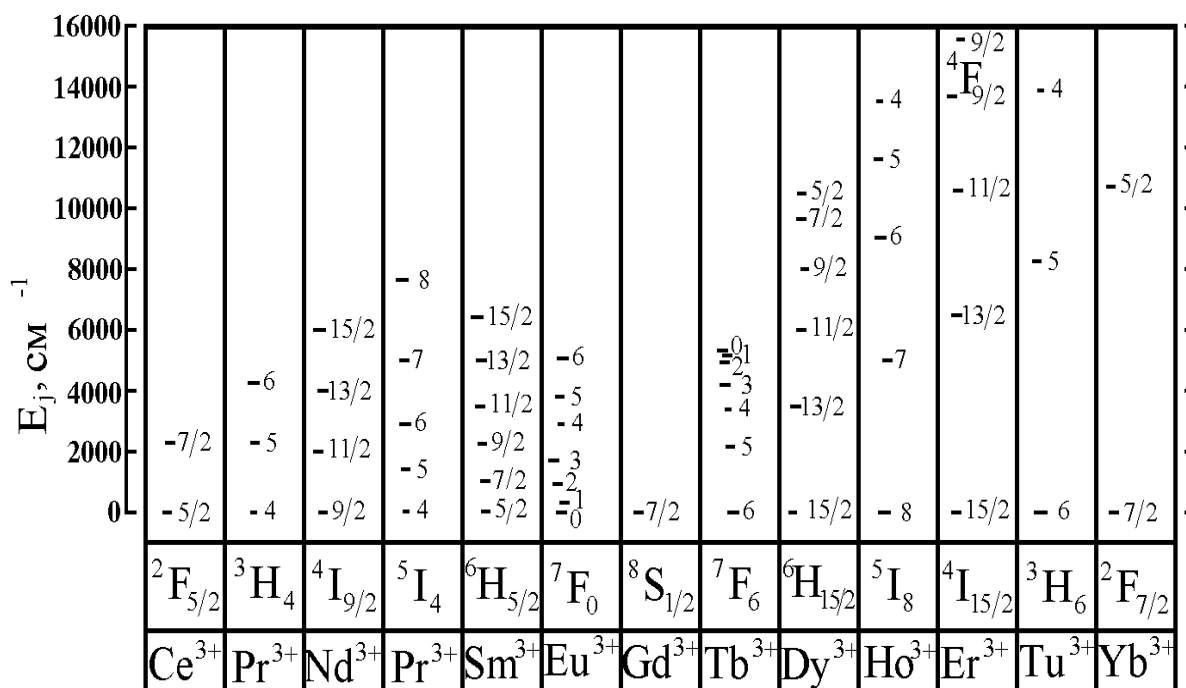
bunda, ΔE -asosiy va uygʻongan sathlar energiyalarining farqi, e - elektronning zaryadi, m - elektronning massasi, h - Plank doimiysi, n - va l – mos ravishda, bosh va orbital kvant sonlari, L - 4f - qobiqdagi elektronlarning toʻla orbital kvant soni, z - atomning tartib nomeri, σ - ekranlash doimiysi.

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 bogʻlanish doimiysi.

(1.1) Ifodada $35 \leq \sigma \leq 36$ deb qabul qilib va (1.2) ifoda bilan hisoblash natijalari (1.1.rasm) va spektroskopik tajribalarning natijalari shuni ko'rsatadiki, og'ir KEM uchun $\Delta E \geq 1000 \text{ cm}^{-1}$. Issiqlik energiyasi (kT) 300K da $208,5 \text{ cm}^{-1}$ ga, 1500K da esa $1042,25 \text{ cm}^{-1}$ ga tengdir. Bu esa og'ir KEM uchun $\Delta E \geq kT$ 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.

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
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	-

1.1-jadval KEM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi

Temir guruhi metallari o'tuvchan metallar sinfiga mansub bo'lib, Mendeleev davriy sistemasidagi skandiydan ($Z=21$) misgacha ($Z=29$) bo'lgan metallar kiradi. Ularning erkin atomlarida 3d – elektron qobiq kechikib to'ladi.

TGM atomlarida 3d qobiqqacha bo'lgan qobiqlar elektronlar bilan to'lgan argon ($Z=18$) atomining elektron konfiguratsiyasiga egadir [1]: $1s^22s^22p^63s^23p^6$.

Bu atomlarning tashqi elektron qobiqlari $3d^n4s^2$ qonuniyat bo'yicha to'ladi, bunda $n=1$ dan (Sc, $Z=21$) $n=10$ gacha (Cu, $Z=29$) o'zgaradi.

Temir guruhi atomlaridan kristall panjara hosil bo'lish jarayonida ularning 4s – qobiqlardagi barcha elektronlar va qisman 3d – qobiq elektronlari kristall panjara tugunlari orasidadagi umumlashgan “erkin” elektronlarga aylanadi va ion holatiga o'tgan atomlar panjara tugunlarida joylashadi. Bu metallarning qattiq holatida tugunlarda o'troqlashgan 3d – qobiqning radiusi (r_{3d}) kristall panjara davrining yarmiga ($a/2$) yaqindir ($r_{3d} \approx \frac{a}{2}$). Shu sababga ko'ra, 3d – elektronlar kristall panjara tugunlarida „yalong'och” holatda, ya'ni tashqi ta'sirlardan xususan, kristall panjara elektr maydonidan ekranlashmagan (himoyalanmagan)

holatda bo'ladilar. TGM metallaridan Cr, Mn, Fe, Co va Ni kuchli magnit xossaga (magnit tartiblangan holatga) ega bo'lgan metallar bo'lib hisoblanadi.

Temir guruhi metallari atomlari va ionlarining elektron tuzilishi haqida asosiy ma'lumotlar 1.2 – jadvalda keltirilgan

Z	Elemen	Atomlar uchun		Ionlar uchun					
		Elektron konfiguratsiya	Term	Ion	Elektron konfiguratsiya	S	L	J	Term
21	Sc	$3d^1 4s^2$	$^3D_{3/2}$	Sc^{3+}	$3d^0$	0	0	0	1S_0
22	Ti	$3d^2 4s^2$	3F_2	Ti^{3+}	$3d^1$	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{3}{2}$	$^3S_{3/2}$
23	V	$3d^3 4s^2$	$^3F_{3/2}$	V^{3+}	$3d^2$	1	3	2	3F_2
24	Cr	$3d^5 4s^1$	7F_9	Cr^{3+}	$3d^3$	$\frac{3}{2}$	3	$\frac{3}{2}$	$^3F_{3/2}$
25	Mn	$3d^5 4s^2$	$^6S_{5/2}$	Mn^{3+}	$3d^4$	2	2	0	5D_0
		$3d^5 4s^2$	$^6S_{5/2}$	Mn^{2+}	$3d^5$	$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$	$^6S_{5/2}$

26	Fe	$3d^6 4s^2$ $3d^6 4s^2$	5D_4 5D_4	Fe^{3+} Fe^{2+}	$3d^5$ $3d^6$	$5/2$ 2	0 2	$5/2$ 4	$^6S_{5/2}$ 5D_4
27	Co	$3d^7 4s^2$	$^4F_{9/2}$	Co^{2+}	$3d^7$	$3/2$	3	$9/2$	$^4F_{9/2}$
28	Ni	$3d^8 4s^2$	3F_4	Ni^{2+}	$3d^8$	1	3	4	3F_4
29	Cu	$3d^{10} 4s^1$ $3d^{10} 4s^1$	$^5S_{1/2}$	Cu^{1+}	$3d^9$ $3d^{10}$	$1/2$ 0	2 0	$5/2$ 0	$^2D_{5/2}$ 1S_0

1.2- jadval TGM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi.

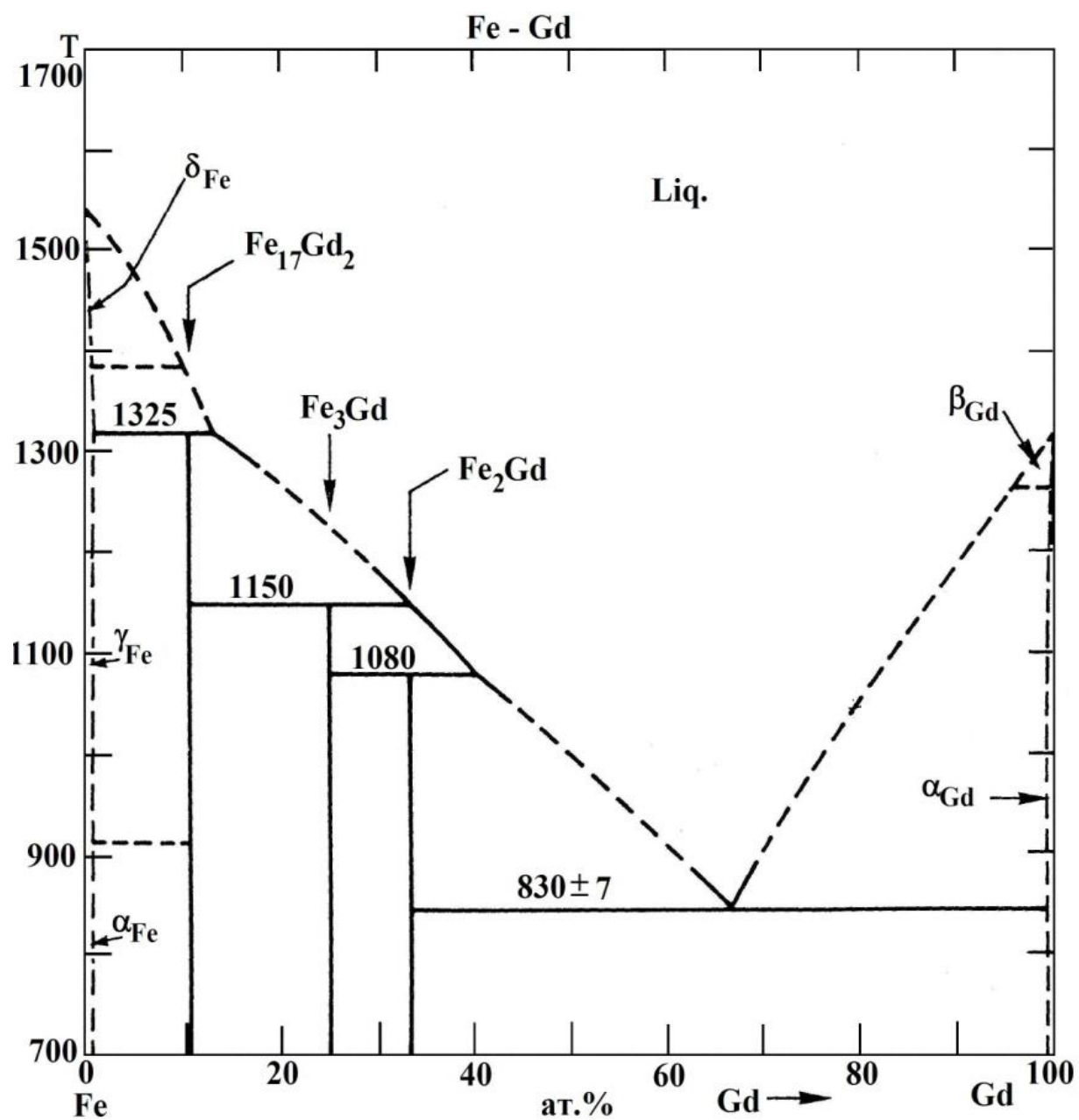
1.2. Gd-TGM (TGM=Fe, Co, Ni) sistemalarining holat diagrammalari.

O'rganilayotgan intermetallik brikmalarning magnit qabul qilauvchanlikning temperaturaga bog'lanishini $\chi(T)$ o'lchash uchun, dastlab shu brikmalar tegishli bo'lgan sistemalarining holat (eruvchanlik) diagrammalari haqidagi, ma'lumotlarni bilish zarur bo'ladi.

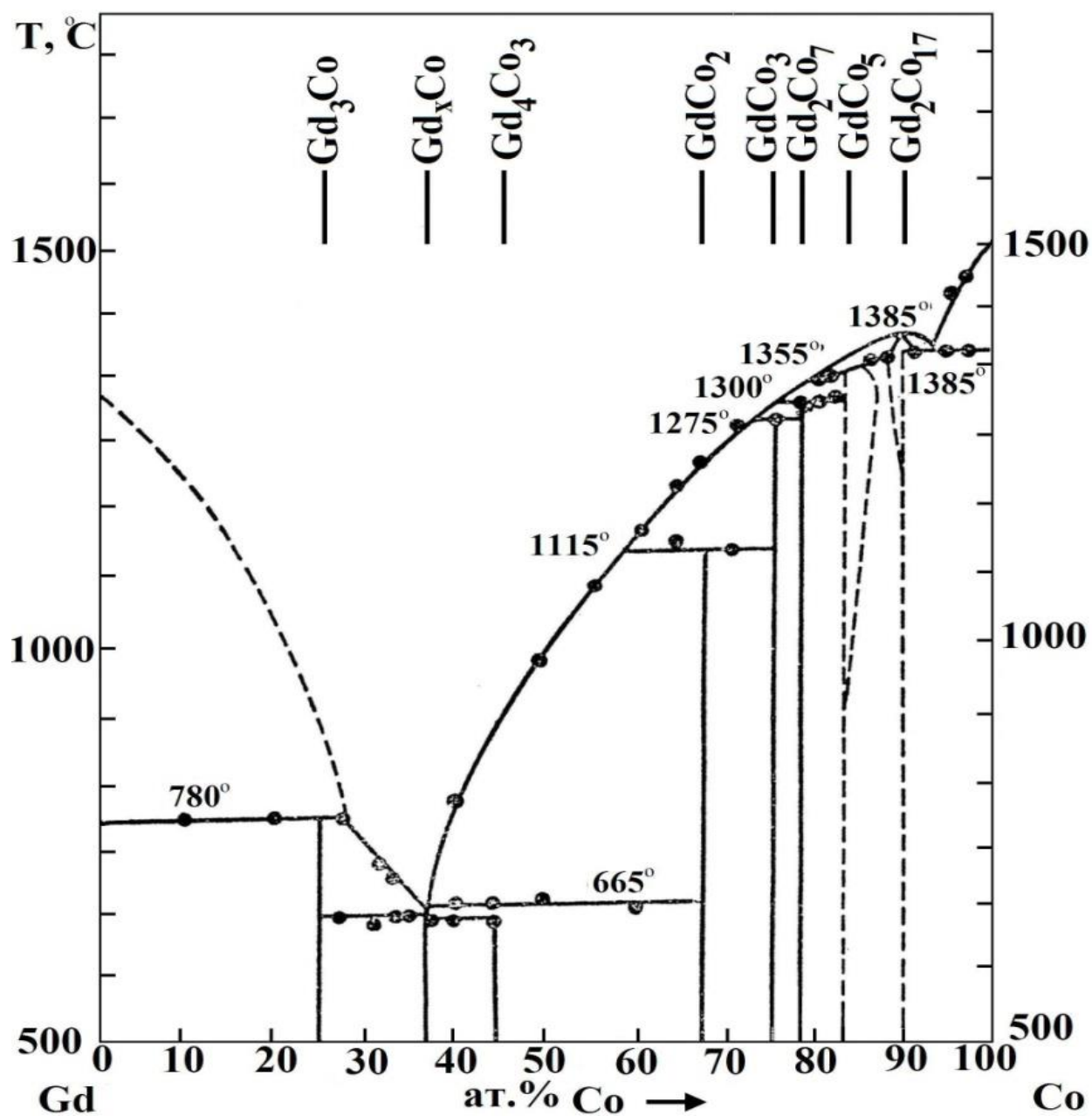
Holat diagrammasidan, brikmaning temperaturasiga bog'liq ravishda, ularda yuz beradigan fazaviy o'tishlarning (polimorf o'tish, erish va h.z.) temperaturalarni aniqlash mumkin. Brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishini o'lchash jarayonida, shu temperaturalarda χ -ning o'zgarishi haqida ma'lumot olishida holat diagrammasi zarur bo'ladi. Quyidagi o'rganiladigan uchta Gd-TGM sistemasining holat qisqacha bayon qilinadi. Gd-TGM(TGM=Fe,Co,Ni) sistemalarining holat diagrammalari 1.2-1.4 rasmlarda keltirilgan[2,7,8]. Bu rasmlardagi diagrammalarni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, Gd-Fe sistemasida uchta (Gd_2Fe_{17} , $GdFe_3$, $GdFe_2$), Gd – Co sistemasida

yettita(Gd_2Co_{17} , $GdCo_5$, $GdCo_4$, $GdCo_3$, $GdCo_2$, Gd_4Co_3 , Gd_3Co) va Gd-Ni sistemasida ham yettita (Gd_2Ni_{17} , $GdNi_5$, $GdNi_7$, $GdNi_3$, $GdNi_2$, $GdNi$, Gd_3Ni) intermetallik brikma hosil

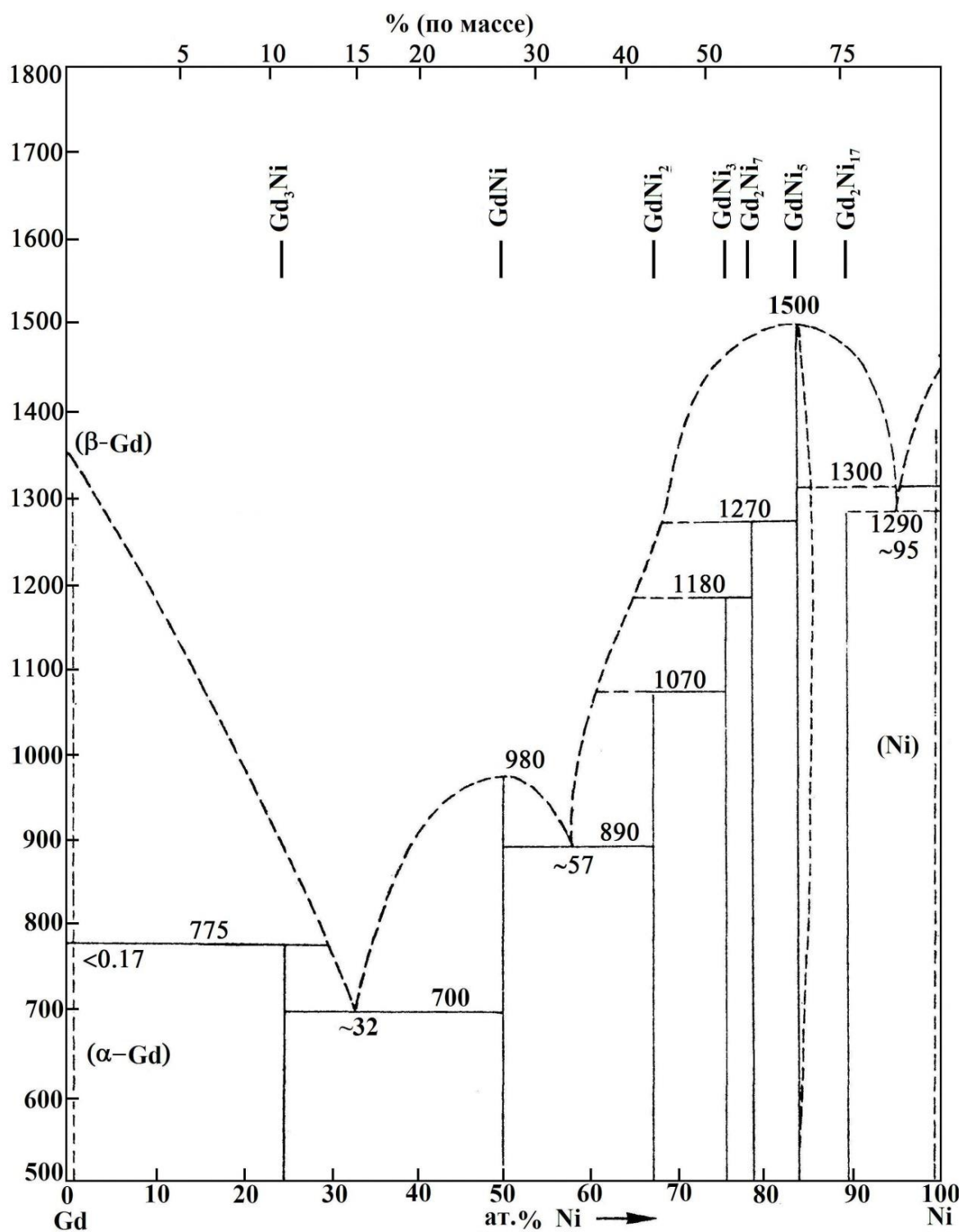
bo'ladi. Bu brikmalarda yuz beradigan fazaviy o'tishlarning temperaturalarini (yoki temperaturalari oraliqlarini) shu holat (eruvchanlik) diagrammalaridan aniqlash mumkin. Bu temperaturalar tegishli diagrammaning peritektik gorizatallarida yoki kongruent erishlarga mos nuqtalar yonida yozib qo'yilgan.



1.2 – rasm. Gd-Fe sistemasining holat diagrammasi [7].



1.3 – rasm. Gd-Co sistemasining holat diagrammasi [2].



1.4 – rasm. Gd-Ni sistemasining holat diagrammasi [8].

1.3. KEM va TGM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.

Ionlardagi kechikib to'ladigan elektron qobiqdagi elektronlarning energetik sathlari energiyasi E -ni bilgan holda Van-Flek tomonidan ishlab chiqilgan paramagnetizmning kvant-mexanik nazariyasi natijalaridan [1,9,10] 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 sektori.

Lande sektori 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 maydonda

$$\left(\frac{\mu_B H}{k_B T} \ll 1 \right)$$

KEM ning erkin ionlari sistemasining magnit qabul qiluvchanligi, ionlar asosiy holatining to`la mexanik moment kvant soni J ga temperaturasi T bilan aniqlanar ekan.

$$\chi_0 = \frac{N_A \alpha_J}{M} = 0$$

bo`lganda (1.3) ifoda quyidagi klassik Xund formulasiga aylanadi:

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

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

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:

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

KEM ionlarning magnit o'zaro ta'siri, energiyaga proportsional bo'lgan, Kyurining paramagnit temperaturasi deb ataladigan, θ_p kattalikni (1.3) ifodaning birinchi hadi maxrajida $T \rightarrow (T - \theta_p)$ almashtira 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 olmaslik mumkin emasligini hisobga olsak (1.3) dan Kyuri-Veyss qonunining umumlashgan ifodasini olamiz:

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

Temir guruhi metallari atomlari(ionlari)ning 3d-qobiq elektronlarining uyg'ongan va asosiy energetik sathlar energiyalarining farqi $\Delta E \ll k_B T$ (T-absolyut temperatura) bo'lgani uchun Van – Flek nazariyasidan bu elementlar magnit

qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishini hisoblash uchun quyidagi ifodani olish mumkin [10]:

$$\chi = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_B^2}{3k_B T} [4S(S+1) + L(L+1)], \quad (1.14)$$

bu ifodada ham quyidagicha belgilash kiritamiz:

$$C = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_B^2}{3k_B T} [4S(S+1) + L(L+1)] = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_{ef}^2}{3k_B}. \quad (1.15)$$

bundagi

$$\mu_{ef} = [4S(S+1) + L(L+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B. \quad (1.16)$$

(1.15) ga asosan (1.14)dan (1.12) ko'rinishdagi quyidagi Kyuri-Veyss qonunining empirik ifodasini olish mumkin.

Shuni alohida qayd etish kerakki, (1.16) ifoda bo'yicha nazariy hisoblangan μ_{ef} ning qiymati, TGM bitta atomiga to'g'ri keladigan magnit momentning tajribaviy qiymatidan ancha katta bo'lib chiqadi. Buning sababi quyidagicha: temir guruhi elementlarining kristall holatida panjara tugunidagi 3d elektronlar, shuningdek ularning orbital magnit momenti, qo'shni tugunlardagi ionlarning kuchli elektr maydoni ta'siridan yaxshi himoya qilinmagan. Shu ta'sir natijada ionlar magnit momentlarining orbital tashkil etuvchisi, kristallda aniq bir yo'nalish olib, qotib („muzlab“) qoladi. Orbital momentning kristall maydoni bilan o'zaro ta'sir energiyasi ion ichidagi spin – orbital bog'lanish energiyasidan ancha katta bo'ladi. Shu tufayli magnit momentning (1.16) ifodadagi orbital tashkil etuvchisini hisobga olmaydigan darajada kichik deb qarash mumkin ($L \approx 0$). U holda (1.16) ifodani quyidagicha yozish mumkin.

$$\mu_{ef} = 2[S(S+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B. \quad (1.17)$$

Agar multipletlik - $2S+1$, yoki $3d$ qobiqdagi juftlashmagan elektronlar soni - N aniq bo'lsa, μ_{ef} ning qiymatini (1.17) dan kelib chiqadigan quyidagi ifoda yordamida ham topish mumkin ($s = \frac{N}{2}$):

$$\mu_{ef} = \sqrt{N(N+2)} \mu_B. \quad (1.18)$$

TGM bitta atomiga to'g'ri keladigan magnit moment-effektiv magnit momentining tajribaviy qiymatini ham (1.15) dan olinadigan (1.11) ifodada foydalanib topiladi. Shuni alohida qayd etish lozimki, TGM ionlari uchun (1.17) yoki (1.18) ifodalar bo'yicha hisoblash natijalar tajriba natijalari bilan yaxshi mos tushadi. KEM va TGM ionlarining asosiy magnit xarakteristikalari mos ravishda 1.3 va 1.4 – jadvallarda keltirilgan.

1.3-jadval KEM^{3+} ionlarining asosiy magnit xarakteristikalari [1-3,5,11]

KEM^{3+}	J (asosiy sath)	g_J	$g_J [J(J+1)]^{1/2} \mu_B$ nazariy	μ_{eff}, μ_B Van-Flek para. 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 – jadval. TGM (Fe, Co, Ni) ionlarining asosiy magnet xarakteristikalari [1].

Ion	3d elektronlar soni	N	μ_{eff}, μ_B , nazariy		$\mu_{\text{eff}},$ μ_B tajr.	Spin orbital yoyilish parametri, (E_{3d}) sm^{-1}
			$\sqrt{N(N+2)}$	$g_J \sqrt{J(J+1)}$		
Sc^{3+}	0	0	0	0	diam.	-
Ti^{3+}	1	1	1.73	1.55	1.8	154
Y^{3+}	2	2	2.83	1.63	2.8	105
Cr^{3+}	3	3	3.87	0.77	3.8	91

Mn ³⁺	4	4	4.9	0	4.9	88
Mn ²⁺	5	5	5.92	5.92	5.9	0
Fe ³⁺	5	5	5.92	5.92	5.9	0
Fe ²⁺	6	4	4.9	6.7	5.4	-103
Co ²⁺	7	3	3.87	6.63	4.8	-178
Ni ²⁺	8	2	2.83	5.59	3.2	-325
Cu ²⁺	9	1	1.73	3.55	1.9	-829
Cu ¹⁺	10	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 5s²5p⁶ 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'zaro ta'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'zaro ta'sir energiyasining o'lchovi hisoblanadi va u quyidagi ifoda bilan aniqlanadi[1]:

$$\theta_p = \frac{3\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) (g_I - 1)^2 I(I + 1) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)), \quad (1.19)$$

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'liq in vektori; $(\vec{R}_n - \vec{R}_m)$ – n - va m -tugunlar orasidagi masofa;

$$F(x) = F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = (x \cos x - \sin x) / x^4 \quad (1.20)$$

– Ruderman – Kittel funksiyasi. (1.19) ifodadagi

$$G = (g_I - 1)^2 I(I + 1) \quad (1.21)$$

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

$$g_I = 1 + \frac{J(J + 1) + S(S + 1) - L(L - 1)}{2J(J + 1)}, \quad (1.22)$$

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 almashinuv o'zaro ta'sir parametri (integrali) ni hisoblash uchun quyidagi ifoda olingan [1,4]:

$$A = \frac{9\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)) . \quad (1.23)$$

buni hisobga olgan holda (1.19) dan quyidagi ifodani olamiz:

$$\theta_p = \frac{1}{3k_B} AG . \quad (1.24)$$

1.1. dan ma'lumki, TGM ionlaridagi 3d qobiq elektronlari kristall panjara tugunlarida „yalang'och" qoladi. Shu tufayli bu qobiq elektronlarining bevosita magnit o'zaro ta'siri yuz berishiga halaqit beradigan, ya'ni ularni ekranlovchi elektron qobiqlar (KEMdagi $5s^25p^6$ larga o'xshash) yo'q. Demak, TGMda faqat bilvosita emas, balki bevosita ta'sir ham amalga oshadi. Bunga $d-d$ o'zaro ta'sir ham deyiladi. TGMda magnit tartiblangan holatni mana shu bevosita almashinuv o'zaro ta'sir hosil qiladi. Shunday o'zaro ta'sirning energetik o'lchovi, TGMda ham, Kyuri temperaturasi hisoblanadi. Almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi TGMning paramagnit Kyuri temperaturasi uchun quyidagi ifodani beradi [1]:

$$\theta_p = \frac{zA}{k_B} . \quad (1.25)$$

bunda z -koordinatsiya soni

1.5. Toza Gadoliny, TGM(TGM=Fe, Co, Ni) va ular orasidagi brikmalarning yuqori temperaturalardagi magnit xossalari.

Bugungi kunda, toza KEM larning magnit xossalarini 300K dan past temperaturalarda, yani ularning magnit tartiblangan holatida, yetarli darajada o'rganilgan. Bu ishlarga [1,3,4] adabiyotlarda sharh berilgan. 300K dan yuqori temperaturalarda, ya'ni bu metallarning paramagnit holatini o'rganishga bag'ishlangan ishlar uncha ko'p emas. Gadolinyning kandinsirlangan paramagnit xolatining magnit xossasi [12-15] ishlarida o'rganilgan.

[12-13] ishlarda gadoliyning $\chi(T)$ bog'lanish 300-1500 K temperaturalar intervalida, ya'ni Gd ning qattiq holatida o'lchangan. $\chi(T)$ bog'lanish Van-Flek nazariyasi bo'yicha tushintirilgan.

[14,15] ishlarda Gadoliyning $\chi(T)$ bog'lanishini, uning suyuq holatini ham qamraydigan 300-200 K temperaturalar intervalida o'lchash natijalari keltirilgan va bu bog'lanish Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi haqida xulosa qilingan.

Temir, nikel va kobalt metallarning $\chi(T)$ bog'lanish ularning suyuq holatini ham qaraydigan yuqori temperaturalarda o'lchash natijalari [16-22] ishlarda bayon qilingan. Bu ishlarning natijalari bo'yicha temirning $\chi(T)$ bog'lanishida, unda yuz beradigan polimor fazaviy o'tishlarning (α - γ va γ - δ) va erish temperaturalariga mos temperaturalarda, sakrab o'zgarishi yuz beradi. Har bir fazaning $\chi(T)$ bog'lanishi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi. Kobaltning $\chi(T)$ bog'lanishida, erishiga nos keladigan temperaturada χ kichik sakrab kamayadi. Nikilning magnit qabul qiluvchanligi ham, kobaltniki kabi, temperature ortishi bilan kamayadi. Uning $\chi(T)$ bog'lanishi umumlashgan Kyuri-Vyess qonuniga bo'ysinadi. Nikilning erishida, uning magnit qabul qiluvchanligi sezirarli darajada o'zgarmaydi.

Gd-(Fe, Co, Ni) sistemalaridagi intermirtallik brikmalarning magnit xossalarini, ularning magnit tartiblangan holatida (300K dan pastda) o'rganishga bag'ishlangan ishlar [3,23-25] sharhiy manbalarda ulushlashtirilgan. Bu brikmalarning magnit xossalarini, 300 K dan yuqori temperaturalarda [26-36] ishlarda tadqiq qilingan .

[26-27] - ishlarda $GdFe_2$, $GdFe_3$ va Gd_2Fe_{17} brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlarini 300-1400 K temperaturalar oralig'ida o'rganilgan va 800 K temperature atrofida anomaliya aniqlangan.

[28] - ishda Gd_2Gd_{17} , $GdCo_5$, $GdCo_7$, $GdCo_3$, $GdCo_2$, Gd_4Co_3 , Gd_3Co brikmalaning $\chi(T)$ bog'lanishi 4.2-1400 K temperaturalar oralig'ida o'lchangan. Gd_3Co dan tashqari barcha brikmalar ferrimagnit bo'lib chiqdi. Bu brikmalalarda bitta Co atomiga to'g'ri keladigan magnit moment, Gd miqdorining oshishi bilan kamayganligi va bu kamayish 3d-zonaning Gd elektronlari bilan to'lishi orqali tushuntirilgan. [29] - ishda, bu brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishi, Kyuri temperaturasidan yuqori temperaturalarda,, Neel qonuniga bo'ysinishi ko'rsatilgan.

[30] - ishda $GdCo_2$ brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishi 9.4-1250 K temperaturalar oralig'ida o'lchangan. Bu brikma uchun $\Theta_p=400$ K, $\mu_{eff} = 5\mu_B$, $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishning giperbolikligi va ferrimagnit tartiblanish aniqlangan.

[31]-ishda $KEMCo_2$ (KEM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er) va Gd_3Co , Gd_4Co_3 , Gd_2Co_{17} , $GdCo_5$, Gd_2Co_7 , $GdCo_3$, $GdCo_2$ brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari 100-1280 K temperaturalar oralig'ida o'rganilgan. Bu brikmalar ferrimagnit tuzilishga ega ekanligi aniqlangan. Kimiyoviy formua birligiga, bitta KEM va Co atomiga tug'ri keladigan magnit momentlar , Kyuri temperaturasi va molekulyar maydon ko'effisientlari aniqlangan.

[32] - ishda Choxralskiy metodi bilan o'stirilgan Gd_3Co brikma kristallining $\chi(T)$ bog'lanishi o'rganilgan. Bu $\chi(T)$ bog'lanish 450 K dan yuqorida Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlangan.

[33] – ishda Gd – Ni sistemasidagi birikmalar paramagnet holatining $\chi(T)$ bog'lanishlari Kyuri – Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlangan. Gd ionidan Ni ioniga elektronlar o'tishi natijasida nikel $3d^{10}$ energetik holatda, ya'ni magnit momenti nolga teng bo'lgan holatda bo'ladi deb xulosa qilingan.

[34-35] - ishlarining natijalari bo'yicha ham $GdNi_5$, $GdNi_2$ va $GdNi$ brikmalarda nikel $3d^{10}$ energetik holatda bo'ladi, ya'ni nomagnit holatda bo'ladi. Demak bu brikmalarda Ni-Ni(d-d) turdagi almashinuv o'zaro ta'sir bo'lmasdan, balki faqat Gd-Gd(f-f) almashinuv o'zaro ta'sir amal qiladi. [36]-ishda 3d va 4f metallarning o'zaro brikmalaridagi almashinuv o'zaro ta'sir o'rganilgan. 3d va 4f elektronlar orasidagi almashinuv o'zaro ta'sir energiyasi, 4f-elektronlar soni oshishi bilan, monoton kamayishi aniqlangan.

Gd – TGM (TG = Fe,Co,Ni) sistemasidagi birikmalarning asosiy magnit xarakteristiklari 1.5 – jadvalda keltirilgan.

1.5 – jadval Gd – (Fe,Co,Ni) sistemalaridagi intermetallik birikmalarning magnit xossalari [4,24,25,28,31]

Birikma	μ_{eff}, μ_B	$\mu_f, \mu_B \text{ mol}^{-1}$	μ_{Gd}, μ_B	μ_{TGM}, μ_B	θ_P, K	T_K, K	T_N, K
1	2	3	4	5	6	7	8
GdFe ₂			29-3.75			785-810	
GdFe ₃			1.6-2.0			728-733	
Gd ₂ Fe ₁₇			21-21.5			460-485	
Gd ₃ Co	8.05	21.5	7.2-8.1	0	160		127-143
Gd ₄ Co ₃	7.9-8.04	26	7	0.66	240-242	233	
GdCo ₂	8.58	4.96	4.3-5.3	1.02	4.25	3.25-420	
GdCo ₃	9.38	2.3	2,2-2,3	1.57	640	611	
GdCo ₄							

1	2	3	4	5	6	7	8
Gd ₂ Co ₇	9.71	2.6	2.4-2.6	1.63	790	767-775	
GdCo ₅		1.4	1.2-1.5	1.67		1020	

Gd_2Co_1 7		14.1	13.5-14.4	1.66		1209-1240	
Gd_3Ni	8.1		5.1-8.1		60		100
$GdNi$	8.1-8.2		7.2-7.4		77	71-73	
$GdNi_2$	7.82-7.98		7.0-7.2		77.5	77-85	
$GdNi_3$			6.55			115-116	
Gd_2Ni_7	6.8		12.65		58	116-118	
$GdNi_5$	7.7-7.94		6.0-6.9		30.5	27-33	
Gd_2Ni_{17}	12.8	14.1	8.8-9.36		138	180-205	

1.6. Tadqiqot muammosining qo'yilishi.

Yuqoridagi adabiyotlar sharhidan shu ma'lum bo'ldiki, bugungi kunda KEMning TGM 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 TGM 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. Gd - TGM (TGM=Fe,Co,Ni) 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 Gd atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentni (μ_{eff}) aniqlash;

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

I-bobga doir xulosalar

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

1. KEM va TGMning elektron tuzilishi;
2. Gd - TGM (TGM=Fe,Co,Ni) binar sistemalarining holat diagrammalari;
3. KEM va TGM uchun paramagnetizmning kvant Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari;
4. KEM, TGM va ularning o'zaro nomagnit metallar bilan birikmalarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganishga bag'ishlangan ishlar;
5. Adabiyotlar sharhidan kelib chiqqan holda, magistrlik dissertatsiyasining dolzarbligi va maqsadi asoslangan.

II-BOB. O'LGHASH 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 [10,37]. Kuchsiz 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.

Ikkinchi guruhga kirgan usullar birjinsli bo'lmagan magnit maydoniga kiritilgan namunaga ta'sir qiluvchi mexanik kuchni o'lchashga asoslangan. Umumiy fizika kursidan ma'lumki [38], 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:

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

bu yerda V – namuna hajmi, $\overrightarrow{M}_y$ - y o'qi bo'yicha namunaning magnitlanish vektori; $\left(\frac{\partial \overrightarrow{H}_y}{\partial x} \right)$ - 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 qabul qiluvchanlik deyiladi:

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

Ko'pincha magnetiklarni xarakterlash uchun hajmiy magnit qabul qiluvchanlik o'rniga solishtirma magnit qabul qiluvchanlik 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 bir jinsli 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

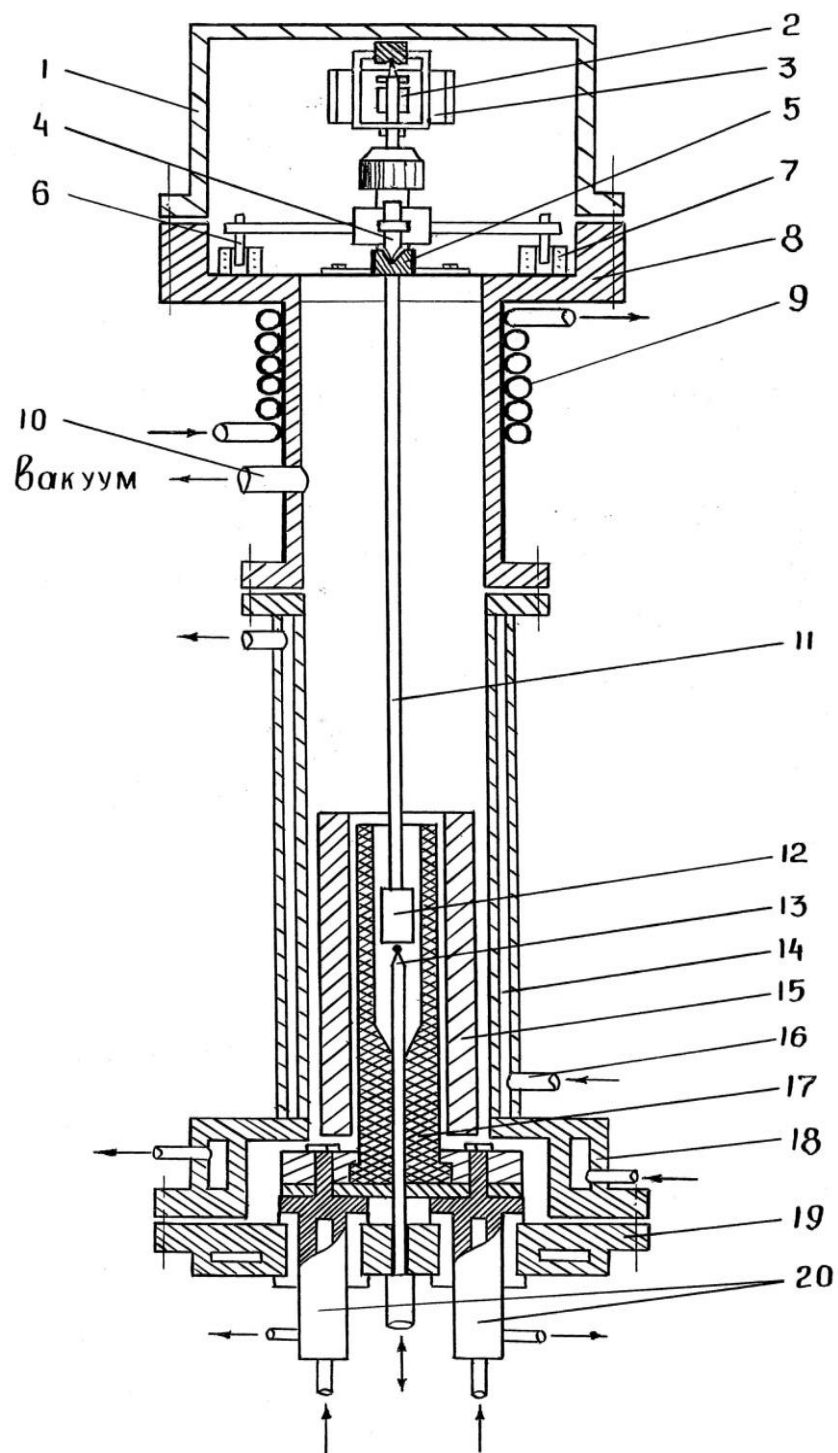
qiluvchanlikni o'lchash uchun Faradey usuli qulaydir. Ushbu ishda shu sababli shu usuldan foydalanildi.

2.2. O'lchash qurilmasining tuzilishi va ishlash prinsipi.

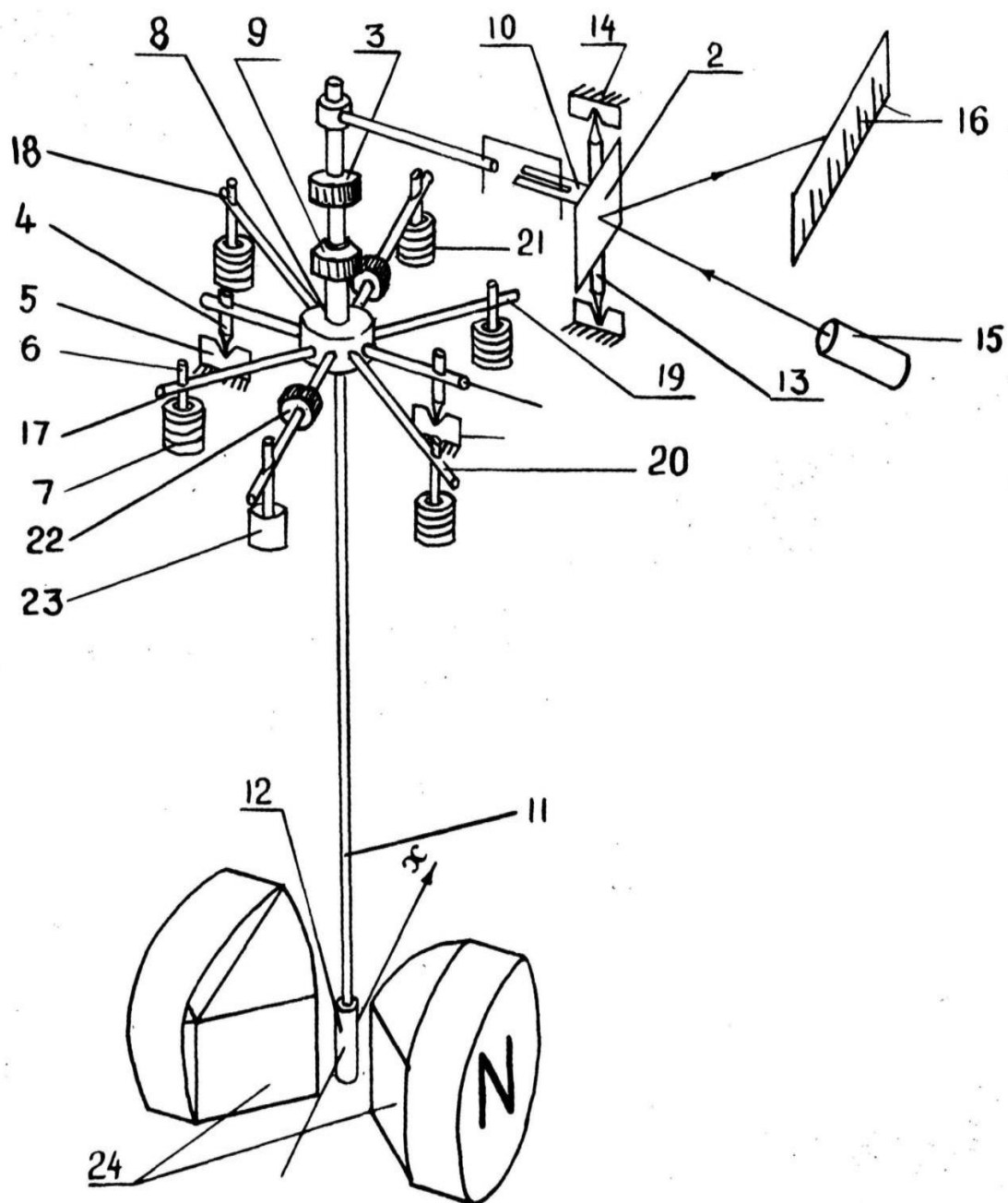
Tekshirilayotgan masalaning qo'yilishiga qarab xilma – xil qurilmalar yasalgan. Bu qurilmalar bir qatorda ishlarda [37-42] yoritilgan. Na'munalarning solishtirma magnit qabul qiluvchanligini o'lchashda [39-42] ishlarda bayoni keltirilgan qurilmadan foydalandik. Bu qurilma vertikal mayatnikli magnit tarozi, 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-osmasi vertikal halatda turadi. Bu osma (mayatnik) faqat α o'qi bo'ylab, 4-ignalar uchidan o'tadigan gorizontal o'q atrofida erkin tebrana oladi. Tarozining sezuvchanligi 3-yuk yordamida o'zgartirilishi mumkin. Tarozining osmasi diametri 2mm bo'lgan molibden simdan yasalgan. U 9-sanga yordamida 8-diskka maxkamlangan. Osmaning pastki uchida, tekshiriladigan na'muna solingan tigel 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 gorizontal o'rnatilgan sterjenga

mahkamlangan molibden sim kirib turadi. Shu simning 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 λ 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 o'lchovchi mayatniksimon magnit tarozi.

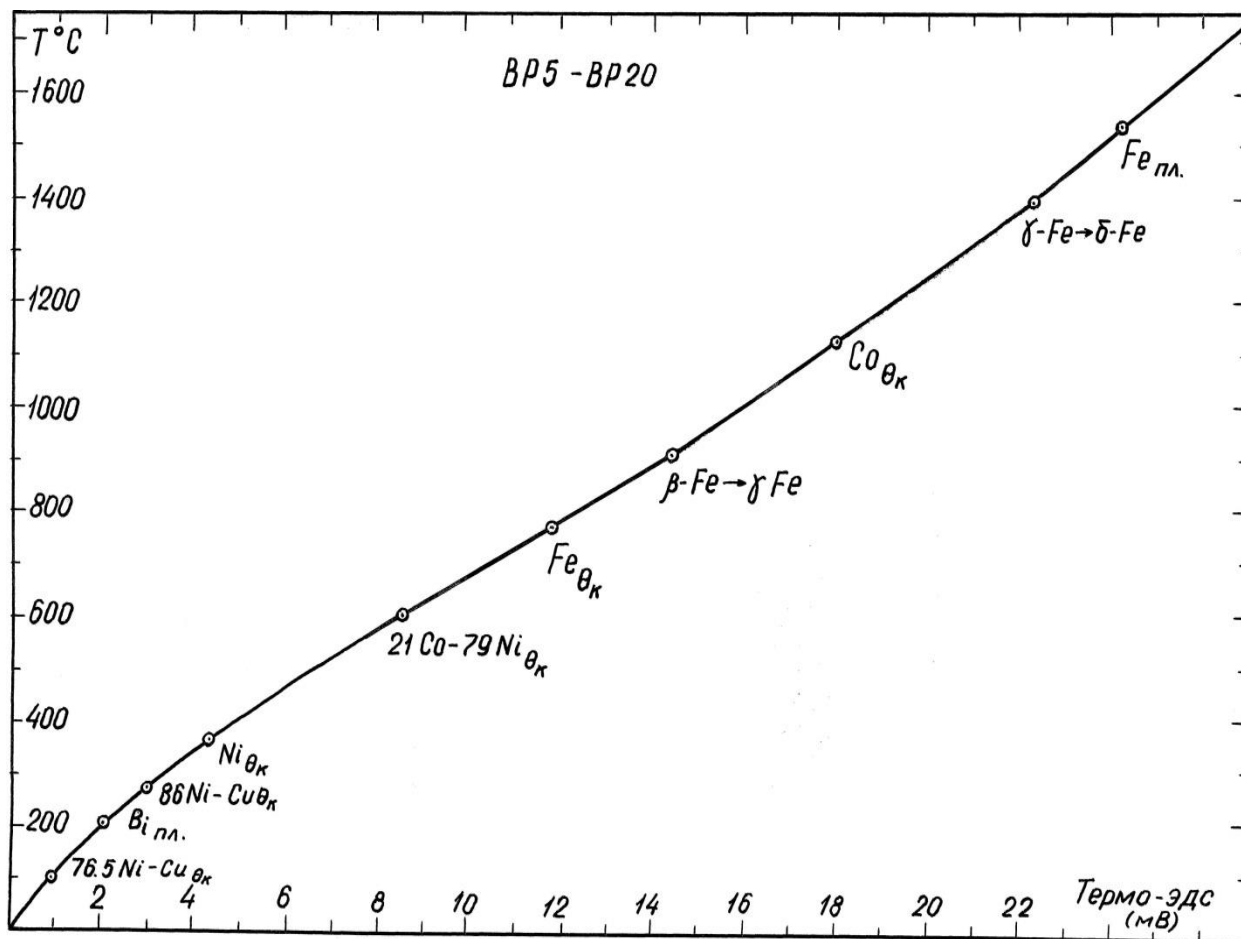
ta'sirini yo'qotish uchun tarozining hamma qismlari nomagnit materiallardan (molibden, mis, dyuralyumen, latun) yasalgan. Tarozi sistemasi tebranishlarini tez so'ndirish uchun u moyli demfer-23 bilan ta'minlangan.

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 (Ret) kuchlanish tushuvi $U = R_e I = IR_e$ 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 temperaturasidagi etalonli va etalonsiz tigellar uchun etalon qarshilikda kuchlanish tushuvlari. Etalon sifatida Mor tuzi ($FeSO_4(NH_4)SO_4 \cdot 6H_2O$) ishlatildi. Uning T uy temperaturasidagi solishtirma magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'liqligini quyidagicha :

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



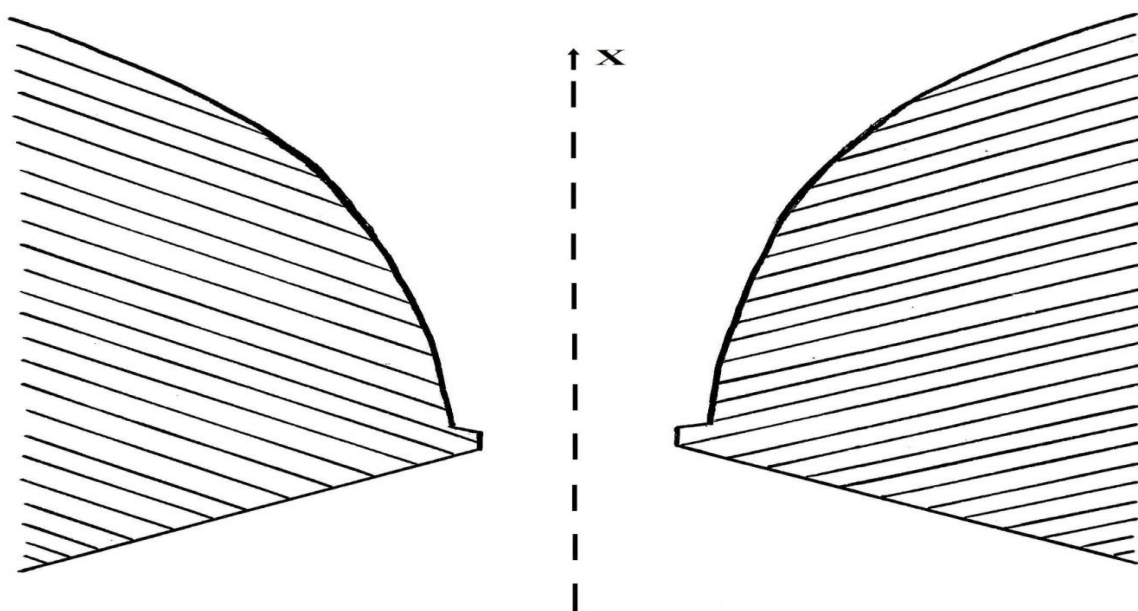
2.3 – rasm. Volfram – reniy termoparasining darajalash chizig'i.

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.

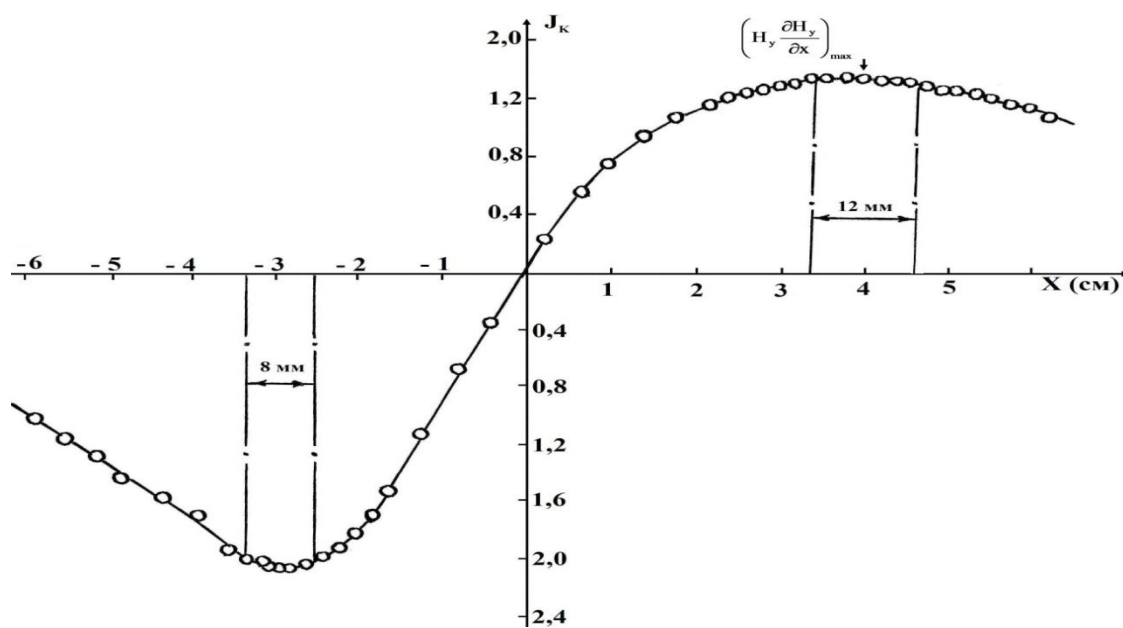
U bifulyar holda yasalgani uchun undan o'tgan tokning magnit maydoni na'munali konteynerga ta'sir qilmaydi. Qizdirgich ichida na'muna joylashtiriladigan o'zgarmas (izotermik) temperatura sohasini olish uchun isitgich berilliy oksididan tayyorlangan silindr ekran (15) bilan o'ralgan. Shunday holda

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 – $358,1^{\circ}\text{C}$) bo'yicha amalga oshirildi. Namuna temperaturasining termopara termo



2.4 – rasm. Elektromagnit qutblarining gorizontol kesimi.



2.5 -

rasm. Kompensatsiya g'altaklaridan o'tayotgan tok kuchi bilan bo'sh tigelnining 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 ΦI – 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 tigelnig elktromagnit qutblari orasidagi holati (x koordinatasi) orasidagi bog'lanishi ko'rinishida 2.5 – rasmda keltirilgan.

Vakuu kamerasi. Magnit tarozi va isitgich suv bilan sovitiladigan vakuum kamerasi ichida joylashtirilgan. Kamera quyidagi qismlardan iborat (2.1 – rasm). 1-qalpoq darchali, 3-darchasi organic 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 bosimdagil spektral jihatdagil 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 oshmaydi; $\left| \frac{\Delta \chi_{et}}{\chi_{et}} \right|$ -etalonning xona temperaturasidagi magnit qabul qiluvchanligini aniqlanishi darajasiga bog'liq bo'lib, 0,2 % dan oshmaydi;

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 oshmaydi. Shunday qilib, (2.7) bo'yicha nisbiy xatolik $\left| \frac{\Delta \chi}{\chi} \right|$ 2% dan oshmaydi.

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 tushmasligi ($\pm 0,2 \text{ mm}$); Bunda χ ni o'lchashdagi maksimal xatolig 0.1 % dan oshmaydi.
 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 oshmaydi.
 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.

Ikkinchi bobga doir xulosalar

1. Tadqiqot ob'ektlarining magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishi [$\chi(T)$] ni, ularning qattiq va suyuq holatlarini qamraydigan, yuqori temperaturalar oralig'ida o'lchash imkoniyatini beradigan usul-Faradey usulining mazmuni bayon qilindi.
2. Tadqiqot ob'ektlarining $\chi(T)$ -bog'lanishlarini, ularning qattiq va suyuq holatida o'lchaydigan qurilmaning tuzilishi va ishlash prinsipi batafsil bayon qilindi.
3. Tadqiqot ob'ektlarining $\chi(T)$ -bog'lanishlarini o'lchash xatoliklari tahlil qilindi va baholandi.

III-Bob. TADQIQOT NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI

3.1 Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemasidagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligini kodensirlangan holatda o'lchash natijalari va ularning muhokamasi

3.1.1. $Gd - Fe$ sistemi. $Gd - Fe$ sistemasidagi birikmalarning magnit qabul qiluvchanligi $20 - 1700^{\circ}C$ temperaturalar oralig'ida, ularning qattiq va suyuq holatlarida o'lchandi. O'lchash natijalari, $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida, 3.1-rasmda keltirilgan. Bu $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarda namunalardagi fazaviy o'tishlarga mos temperaturalar, $Gd - Fe$ sistemasining holat diagrammasidagi (1.2-rasm) fazaviy o'tishlar temperaturalari bilan yaxshi mos tushadi.

temperaturalarda, mos ravishda yuz beradigan α (X.M.K)- δ (Yo.M.K.), δ (Yo.M.K.)- γ (H.M.K.) va erish fazaviy o'tishlar uning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishida sakrashlar ko'rinishida aks etadi. 910°C dagi fazaviy o'tishda va 1395°C dagi erishda χ^{-1} sakrab oshadi, 1395°C dagi fazaviy o'tishda esa-sakrab kamayadi. 3.1-rasmdan yana shu narsa ko'rinish turibdiki, temirning har bir qattiq fazasi va suyuq fazasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanish chiziqli tabiatga ega. Bu tajribaviy dalil shu fazalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari (1.12) ko'rinishdagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishidan dalolat beradi.

3.1-rasmdan ko'rinish turibdiki, Gd uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishi, uning qattiq holatida ham, suyuq holatida ham chiziqli tabiatga ega va erish jarayonida sezilarli o'zgarmaydi. Demak, Gd ning $\chi(T)$ bog'lanishi ham Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi.

3.1-rasmdan yana shu narsa ko'rinish turibdiki, $\text{GdFe}_2, \text{GdFe}_3, \text{Gd}_2\text{Fe}_{17}$ brikmlar χ^{-1} qiymatlari $750 - 780^{\circ}\text{C}$ temperaturalar oralig'ida sakrashsimon oshadi. Buni shu brikmalarning temir panjarasida $\alpha \rightarrow \gamma$ (Yo.M.K $\rightarrow$ H.M.K) polimorf fazaviy o'tishning ta'sirida yuz beradi deb izohlash mumkin. Temperaturaning 780°C dan ortib borishi bilan χ^{-1} ning o'zgarishi quyidagi ko'rinishdagi Neel qonuni bo'yicha yuz beradi [43]:

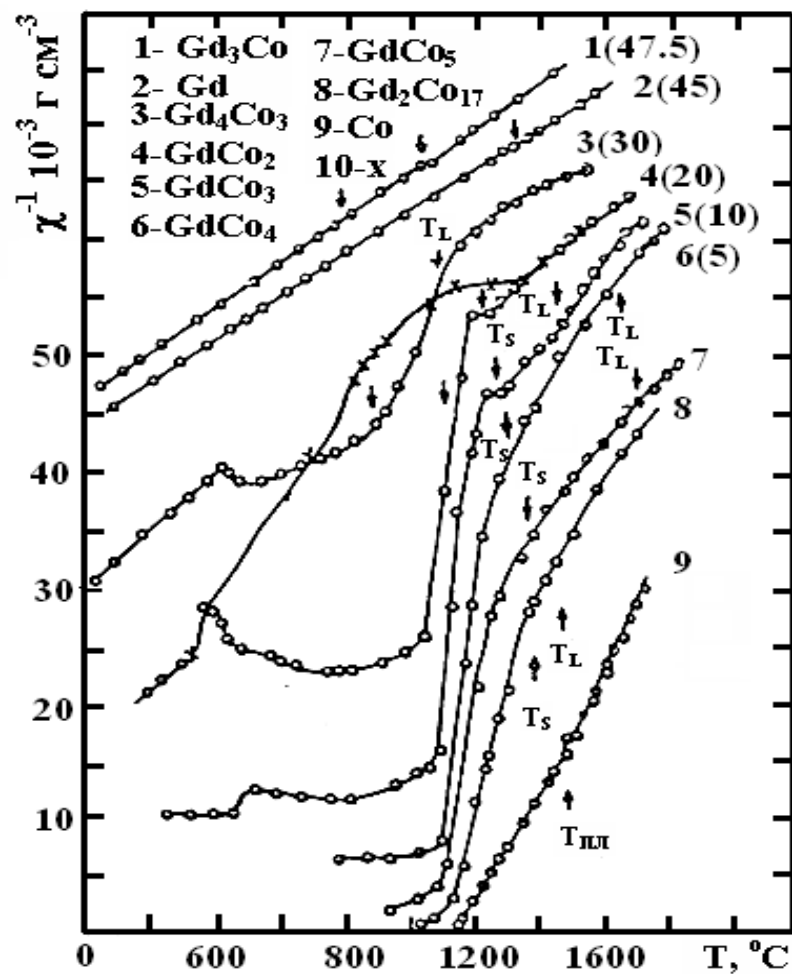
$$\frac{1}{\chi} = \frac{T}{C} + \frac{1}{\chi_0} - \frac{\delta}{T - \theta_1}, \quad (3.1)$$

bundagi C , χ_0 , δ , θ_1 Neel nazariyasidagi molekulyar maydon koeffitsientlari (doimiylari). Bu brikmalarning erish jarayonida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanish (toza gadoliniydagidek) sezilarli o'zgarmaydi. Bu 4f-elektronlar brikmalarning magnit xossasini hosil bo'lishida hal qiluvchi rol o'ynashidan dalolat beradi.

$GdFe_2, GdFe_3$ va Gd_2Fe_{17} brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari suyuq holat uchun chiziqli tabiatga ega va demak, bu bog'lanishlar (1.12) ko'riishdagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi. Gd-Fe sistemasidagi namunalarning asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash haqida §3.2 da yozilgan.

3.1.2. Gd-Co sistemi. Gd-Co sistemasida hosil bo'ladigan $Gd_3Co, Gd_4Co_3, GdCo_2, GdCo_3, GdCo_4, GdCo_5$ va $GdCo_{17}$ brikmalarning magnit qabul qiluvchanligi $20 - 1700^\circ C$ temperaturalar oralig'ida o'lchandi. O'lchash natijalari $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida 3.2-rasmda keltirilgan. Bu $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarda namunalardagi fazaviy o'tishlarga mos temperaturalar, Gd-Co sistemasining holat diagrammasidagi (1.3-rasm) fazaviy o'tishlar temperaturalarini bilan yaxshi mos tushadi.

3.2-rasmdan ko'rinib turibdiki, Gd, Co toza metallar va Gd_3Co brikma uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanish, qattiq va suyuq holatlarda, chiziqli tabiatga ega. Demak bu namunalarda uchun $\chi(T)$ bog'lanish (1.12) ko'rinishdagi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi.



3.2-rasm. Gd, Co va ular orasidagi brikmalarning qattiq va suyuq holatlari uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar. χ^{-1} larning haqiqiy qiymatini topish uchun 3.1 rasm ostidagi yozuvga qarang.

Bu namunalarning polimorf o'tish va erishish jarayonlarida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishda sezirarli o'zgarishi kuzatilmaydi. Bu dalil shu namunalarning magnit xossasi lokal (o'troqlashgan) tabiatga egaligidan dalolat beradi.

3.1-rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, boshqa o'rganilgan brikmalarning, ayniqsa $GdGo_2, GdCo_3$ va Gd_4Co_3 brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari murakkab tabiatga ega. Bu brikmalarning qattiq holatida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanish taxminan $400^{\circ}C$

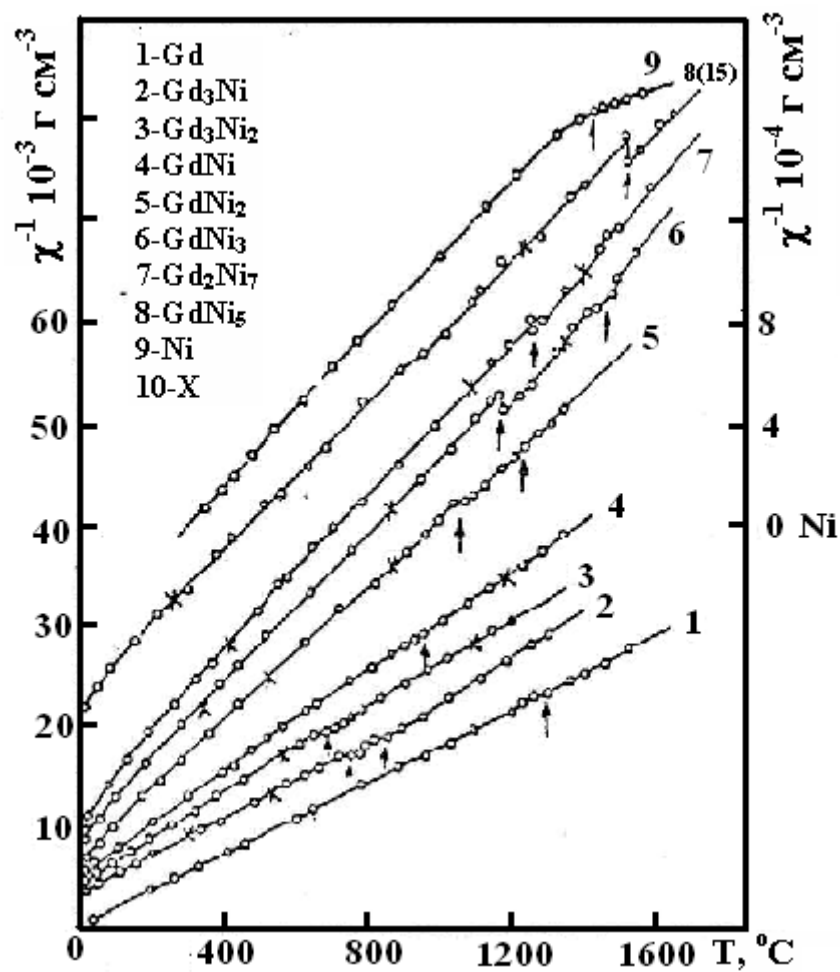
gacha chiziqli tabiatga ega; $400 - 900^{\circ}\text{C}$ temperaturalar oralig'ida esa murakkab tabiatga ega; keyin $T > 900^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda (3.1) ko'rinishdagi Neel qonuniga bo'ysinadi. GdCo_4 , $\text{Gd}_2\text{Co}_{17}$, GdCo_5 brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari ham $T > 900^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda (3.1) ko'rinishdagi Neel qonuniga bo'ysinadi. Neel qonuni ifodasi-(3.1) Kyuri-Veyss qonuni ifodasi-(1.12)dan $\frac{\delta}{(\tau - \theta)}$ qo'shiluv bilan farq qiladi. Shu tufayli bu brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari (3.2-rasm) $T > 900^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda chiziqli emas, balki giperbolik tabiatga ega bo'lib qoladi.

Shuni alohida qayd etish muhimki, GdCo_2 brikmaning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishida(3.2-rasm) $400 - 1100^{\circ}\text{C}$ temperaturalar oralig'ida temperature gisterezisi yuz beradi: brikma qizishida uning magnit qabul qiluvchanligining (χ^{-1}) sakrashsimon oshishi, sovishida esa bu jarayonning shu temperatura intervalida rilmasligi kuzatiladi. Bunday gisterezisning sababini, ferritlarda shunga o'xshash gisterizisni kuzatgan tadqiqotchilar fikricha[3], peritektik reaksiya temperaturasidan past temperaturada brikmaning kristall panjarasida vakansiyalarning qayta taqsimlanishi bilan bog'liq deb tushuntirish mumkin. Bunday qayta taqsimot diffuzion xarakterga ega bo'lar ekan.

3.2-rasmdan ko'rinib turibdiki GdCo_2 , Gd_4Co_3 , GdCo_3 brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari, taxminan, $T > 1100^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda (3.1) ko'rinishdagi Neel qonuniga bo'ysinadi. $\text{Gd} - \text{Co}$ -sistemasidagi namunalarning asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash haqida §3.2da bayon qilingan.

3.1.3. Gd-Ni sistemasi. Gd-Ni sistemasidagi namunalarning magnit qabul qiluvchanligi, ularning qattiq va suyuq holatlarida, ya'ni kandensirlangan holatida 20-1700⁰C temperaturalar oralig'ida ulchandi. Toza Gd, Ni va ular orasida hosil bo'ladigan $Gd_3Ni, Gd_3Ni_2, GdNi, GdNi_2, GdNi_3, Gd_2Ni_7, GdNi_5$ –brikmalarning magnit qabul qiluvchanligini o'lchash natijalari $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar ko'rinishida 3.3-rasmda keltirilgan. Shu toza metallar va brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida aks etgan fazaviy o'tishlarning temperaturalarini $Gd - Ni$ sistemasining holat diagrammasidagi (1.4-rasm) fazaviy o'tishlar temperaturalarini bilan yaxshi mos keladi.

3.3 rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, barcha o'rganilgan brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari (1.13) ko'rinishdagi umumlashgan Kyuti-Veyss qonuniga bo'ysinadi.



3.3-rasm. Gd, Ni va ular orasidagi brikmalarning qattiq va suyuq holatlari uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.

χ^{-1} larning haqiqiy qiymatini topish uchun 3.1 rasm ostidagi yozuvga qarang.

Namunalar uchun χ_0 -ning qiymatlari, ularning har birining tajribaviy $\chi(\frac{1}{T})$ bog'lanishlaridan aniqlandi ($T=\infty, \chi = \chi_0$). Shu usulda topilgan χ_0 -ning qiymatlari 3.1-jadvalda keltirilgan.

3.1-jadval Gd-Ni sistemasi uchun χ_0 -ning qiymatlari

Namuna	Gd	Gd_3Ni	Gd_3Ni_2	GdNi	$GdNi_2$	$GdNi_3$	Gd_2Ni_{17}	$GdNi_5$	Ni
$\chi_0 \cdot 10^6$, $g^{-1} \cdot cm^3$	7.5	0.55	3.25	4.52	5.12	5.25	3.82	2.85	5.85

3.1-jadvaldan ko'runib turibdiki, χ_0 -ning qiymati namunalarning $\square$ ga nisbatan hisobga olmaslik darajada kichik va shu tufayli u $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarning (3.3-rasm) chiziqli tabiatiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. 3.3-rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, Gd_3Ni , Gd_3Ni_2 , GdNi va $GdNi_2$ brikmalarning erish jarayonida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarda sezilarli o'zgarish kuzatilmasdan, faqat sinish kuzatiladi; $GdNi_3$, Gd_3Ni_2 va $GdNi_5$ brikmalrning erishida esa kichik sakrashlar yuz beradi. Bu tajribaviy dalil Gd-Ni sistemasidagi o'rganilgan namunalarning magnit xossasi, lokal (o'troqlashgan) tabiatga ega ekanligidan dalolat beradi.

O'rganilgan namunalarning asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash haqida §3.2 da yozilgan.

3.2. Gd – TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemasidagi birikmalaning asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash.

Gd – TGM (TGM=Fe,Co,Ni) 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 [44,45] ishlarda bayon qilingan tavsiyalardan foydalanib, (1.12) ifoda quyidagi ko'rinishda yozildi:

$$\chi^{-1} = \frac{T - \theta_p}{C} = \frac{T}{C} - \frac{\theta_p}{C}.$$

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:

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

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

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. A va B koeffisientlarni (3.2) va (3.3) ifodalar bo'yicha hisoblash;
4. C va 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 gadolinining bitta atomiga to'g'ri keluvchi effektiv magnit momentini (μ_{eff}), va birikmada bitta Gd atomiga to'g'ri keladigan magnit moment (μ_{eff}) hisoblandi.

Toza gadolini 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 – gadolinining atomar massasi.

O'rganilgan birikmalarda bitta gadolini atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnet moment ifodasi quyidagi mulohaza bo'yicha aniqlandi: additivlik qoidasi bo'yicha va gadolini metalli magnet qabul qiluvchanligi birikmaning tajribada aniqlanadigan magnet qabul qiluvchanligining (χ) $(100-x)/100$ qismiga to'g'ri kelishini hisobga olib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$MC = \frac{M_1(100 - x) + M_2x}{100} \cdot \frac{100}{100 - x} C = \left(M_1 + \frac{xM_2}{100 - x} \right) C, \quad (3.8)$$

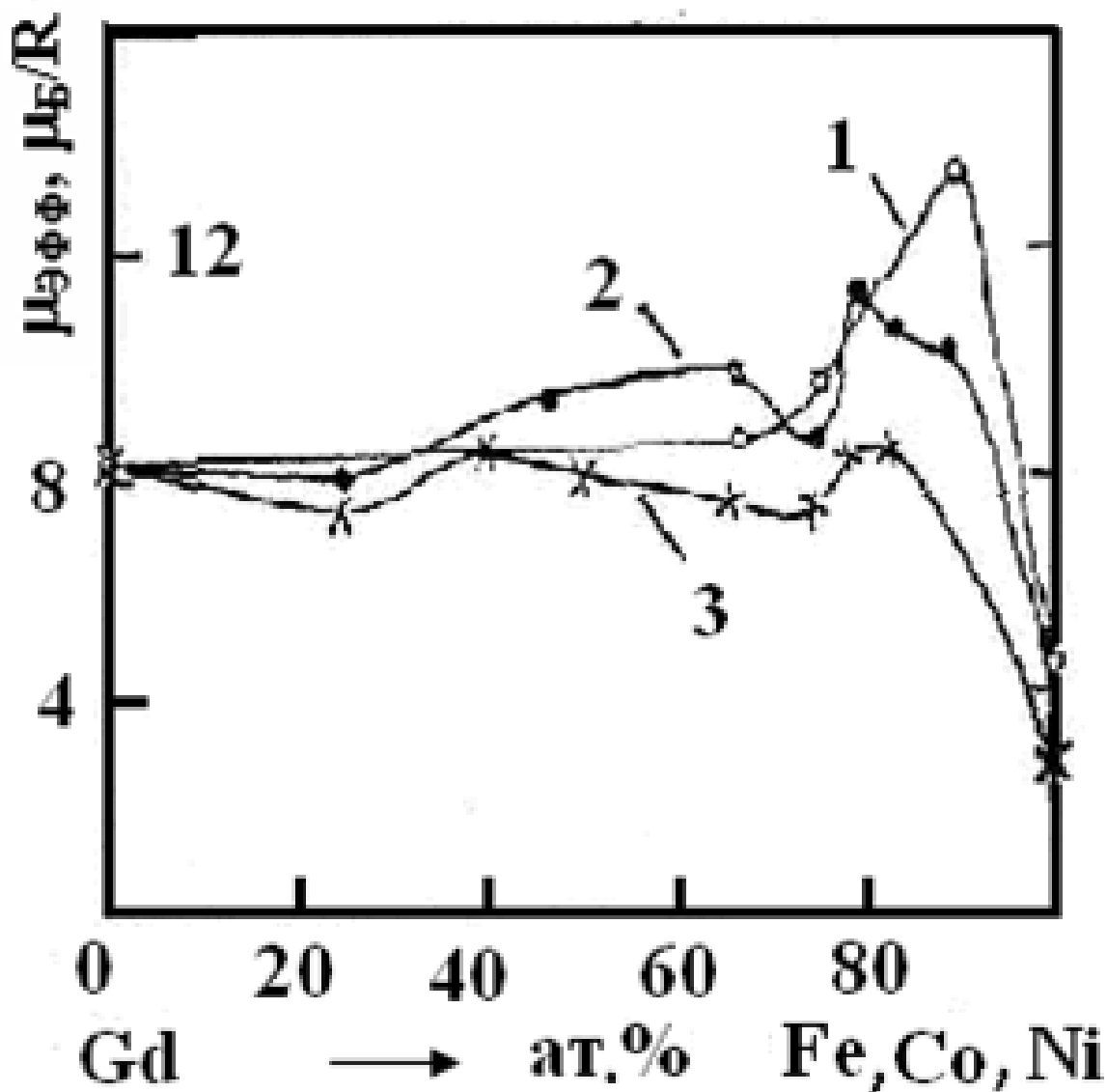
bu yerda M_1 va M_2 – mos ravishda gadolini va TGM (TGM=Fe,Co,Ni) larning atomar massalari; x - TGMning) birikmadagi at. % dagi konsentratsiyasi. (3.7) va (3.8) ifodalardan izlayotgan ifodani olamiz:

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

O'rganilgan Gd – (Fe,Co,Ni) sistemalaridagi birikmalarning asosiy magnet xarakteristikalarini hisoblash natijalari 3.1 – jadvalda va 3.4 rasmda keltirilgan.

3.1 – jadvaldan ko'rinib turibdiki μ_{eff} va θ_p larning qiymati Gd – Fe sistemasida temir konsentratsiyasining oshishi bilan qattiq holatda kamayadi suyuq holatda esa oshadi. μ_{eff} Gd₂Fe₁₇ birikma uchun eng kata qiymatga ega bo'ladi. Gd – Co sistemasida μ_{eff} va θ_p larning qiymati Co konsentratsiyasining oshishi bilan ularning qattiq holatida ham, suyuq holatida ham oshadi. Gd – Ni sistemasida μ_{eff} va θ_p larning qiymatlari Ni konsentratsiyasining oshishi bilan biron bir umumiy qonuniyatga bo'ysunmagan holda o'zgaradi. Birikmalar uchun μ_{eff} ning tajribaviy qiymati Gd³⁺ erkin ionning (1.10) ifoda bo'yicha hisoblangan nazariy qiymatiga yaqindir. Bu o'rganilgan birikmalarning magnet xossasining hosil bo'lishida Gd dagi 4f elektronlar muhim rol o'ynaydi. TGM atomlari o'rganilgan birikmalarda 4f elektronlarning Gd panjarasi tugunida o'roqlashishiga deyarlik ta'sir ko'rsatmaydi.

Shuni alohida qayt etish kerakki, o'rganilgan birikmalarning 3.1 – jadvalda keltirilgan asosiy magnit xarakteristikalari 1.5 – jadvalda keltirilgan boshqa tatqiqotchilarning natijalari bilan qoniqarli darajada mos keladi.



3.4 – rasm. Gd – (Fe,Co,Ni) sistemalaridagi namunalarning suyuq holatlari uchun μ_{eff} qiymatlari: 1 – Gd – Fe; 2 – Gd – Co; 3 – Gd – Ni.

3.2 - jadval Gd –(Fe,Co,Ni) sistemalaridagi birikmalarning magnit xarakteristikalari

Birikma	Qattiq holat			Suyuq holat		
	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2}, \text{cm}^3 \cdot K \cdot \Gamma^{-1}$	$\mu_{\text{эфф}}, \mu_B$	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2}, \text{cm}^3 \cdot K \cdot \Gamma^{-1}$	$\mu_{\text{эфф}}, \mu_B$
Gd	313	4,25	8,10	323	5,33	8,60
GdFe ₂	803			53	3,2	8,3
GdFe ₃	713			123	3,4	9,67
Gd ₂ Fe ₁₇	463			243	3,5	13,15
Gd ₃ Co	158	5,34	8,7	323	4,5	8,0
Gd ₄ Co ₃	243			-177	5,37	9,31
GdCo ₂	413			23	4,39	9,89
GdCo ₃	503			633	2,62	8,37
GdCo ₄	623			277	3,89	11,0
GdCo ₅	1073			523	3,17	10,7
Gd ₂ Co ₁₇	1233			1053	2,07	10,45
Gd ₃ Ni	63	5,7	9,0	353	4,2	7,72
Gd ₃ Ni ₂	88	4,3	8,2	113	4,5	8,4
GdNi	78	4,0	8,3	183	3,7	8,0
GdNi ₂	79	2,9	8,0	203	2,8	7,86
GdNi ₃	113	2,3	7,8	543	1,9	7,1
Gd ₂ Ni ₇	58	2,35	8,16	98	2,3	8,2
GdNi ₅	30	2,6	9,8	483	2,1	8,7

3A.3. Gd – (Fe,Co,Ni) sistemlarida amal qiluvchi bilvosita o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish.

§1.3 da aytilganidek, KEMning magnit xossasini, kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan, 4f-elektronlar, TGM da esa 3d-elektronlar hosil qiladi. §1.1 da aytilganidek 4f-elektronlar kristall panjara tugunlarida $5s^25p^6$ elektronlar bilan kristall panjara maydoni ta'siridan himoyalangan bo'ladi; 3d-elektronlar esa "yalong'och" holda joylashib kristall maydoni ta'siridan himoyalanmagan 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 (f-s-f yoki qisqacha f-s) almashinuv o'zaro ta'sir yoki RKKI o'zaro ta'siri deyiladi.

TGMda 3d-elektronlarning bevosita o'zaro ta'sirlashuv ehtimoliyati bilvosita o'zaro tasirlashuv ehtimoliyatidan katta. Shuning uchun ham TGMning magnit tartiblangan holatini hosil bo'lishida 3d-elektronlarning bevosita (d-d) almashinuv o'zaro ta'siri asosiy rol ni o'ynaydi.

KEM va TGM orasida hosil bo'ladigan brikmlar magnit tartiblangan holatining hosil bo'lishiga sabab bo'ladigan almashinuv o'zaro ta'sirining tabiati haligacha to'la aniqlanmagan. Bu yerda turli xildagi o'zaro ta'sirlar amal qilishi mumkin: KEM panjarasi tugunlaridagi 4f-elektronlarning erkin elektronlar orqali o'zaro (bilvosita f-s) ta'siri, KEM va TGM panjaralari tugunlaridagi 4f va 3d elektronlarning erkin elektronlar orqali o'zaro (bilvosita f-d) ta'siri va TGM panjarasi tugunlaridagi 3d-elektronlarning erkin elektronlar orqali (bilvosita d-s) o'zaro ta'siri.

Bunday bilvosita f-s, f-d va d-s almashinuv o'zaro ta'sirlarining energitik o'lchovi vazifasini o'rganilgan Gd-(Fe, Co, Ni) sistemalaridagi birikmalarning

paramagnit Kyuri temperaturasi- θ_p (§1.4 da qayd qilinganidek) bajaradi. θ_p va almashinuv o'zaro ta'sir parametri (yoki integrali) A orasida §1.4 da keltirilgan (1.24) bog'lanish, ya'ni quyidagi bog'lanish mavjud [46,47]:

$$\theta_p = \frac{AG}{3k_B}.$$

Bundan quyidagini 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 faktori g_J quyidagicha aniqlanadi:

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

bundagi L , S va J -4f (yoki 3d)-elektronlarning, Xund qoidalari bo'yicha aniqlanadigan to'la orbital, to'la spin mehanik va to'la mehanik moment kvant sonlari.

Toza Gd da amal qiladi bilvosita f-s o'zaro ta'sir uchun va toza Fe, Co, Ni –larda amal qiladigan bilvosita d-s o'zaro ta'sir uchun (3.2), mos ravishda, quyidagi ko'rinishlarda yoziladi:

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

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G_{TGM}} \quad (3.6)$$

Xund qoidasi bo'yicha Gd uchun, 4f-qobiq yarmiga to'lgani sababli va TGM uchun, (§1.1 da qayd etilganidek) orbital mexanik (va demak orbital magnit) momentning "muzlab qolishida" effekti sababli $L=0$, $J=S$ bo'lishini e'tiborga olsak, (3.5) va (3.6) lardagi de Jen faktorlari [(3.4) ni hisobga olganda] quyidagi ifodalarlar yordamida aniqlanadi:

$$G_{Gd} = (g_s - 1)^2 * S(S + 1), G_{TGM} = (g_s - 1)^2 S(S + 1). \quad (3.7)$$

Quyidagi muloxazalarga tayanib, o'rganilgan intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita f-s, f-d va d-s o'zaro ta'sir parametrini ham (3.2) yordamida hisoblash mumkin: 1) Teylar [4] bo'yicha f-d o'zaro ta'sir ham erkin elektronlar orqali amalga oshadi. Bu KEM va TGM ionlaridagi 4f va 3d qobiqlarning magnit momentlari erkin elektronlarni qutblash orqali amalga oshadi. §1.4 dagi (1.19) va (1.23) ifodalardalardagi $A_{sf}^2(0)$ had o'rniga $A_{sf}(0) \cdot A_{sd}(0)$ ko'paytma olinadi; 2)

Birikma uchun de Jen faktorini additivlik qoidasiga asosan hisoblash mumkin:

$$G = (1 - \square) G_{Gd} + \square G_{TGM}, \quad (3.8)$$

bundagi $\square$ -TGM ning atom ulushlaridagi konsentratsiyasi.

(3.7) ifodani hisobga olganda, o'rganilgan birikmalarda amal qiluvchi f-s, f-d va d-s bilvosita o'zaro ta'sir parametrlarini hisoblash uchun, quyidagi ifodalarni olish mumkin:

f-s o'zaro ta'sir uchun:

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

f-d o'zaro ta'sir uchun:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{Gd} + xG_{TGM}}, \quad (3.10)$$

f-s o'zaro ta'sir uchun:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{xG_{TGM}}. \quad (3.11)$$

Gd-(Fe, Co, Ni) sistemalarida o'rganilgan namunalarning, §3.1da ularning $\chi^{-1}(T)$ tajribaviy bog'lanishlaridan aniqlangan θ_p -larning qiymatlaridan foydalanib, (3.5), (3.6) va (3.9)-(3.11) ifodalardan foydalanib bilvosita f-s, f-d va d-s o'zaro ta'sirlarning parametrlarini hisoblash natijalari 3.3- jadvalda va 3.4-3.6 rasmlarda keltirilgan [46,47].

Bunda de Jen faktorini (3.7) bo'yicha hisoblashda $Gd^{3+}, Fe^{3+}, Co^{2+}$ va Ni^{2+} ionlari asosiy energitik holatlarining to'la spin mexanik moment kvant soni S-ning, 1.1 va 1.2 jadvallarda keltirilgan, qiymatlaridan foydalanildi.

3.3 jadvaldan ko'rinib turibdiki, $\frac{A}{k_B}$ - parametrning namunalar qattiq holati uchun qiymatlari ularning suyuq holati uchun qiymatlaridan katta. 3.4-3.6 rasmlardan ko'rinib turibdiki, o'rganilgan uchta sistemada amal qiluvchi o'zaro ta'sirlardan eng kichigi f-d o'zaro ta'sirdir. Gd-Fe sistemasida f-s o'zaro ta'sir eng kuchli bo'lib, u Fe konsentratsiyasining oshishi bilan oshadi. d-s o'zaro ta'sir, kattaligi bo'yicha, f-s va f-d o'zaro ta'sirlar oralig'ida yotadi.

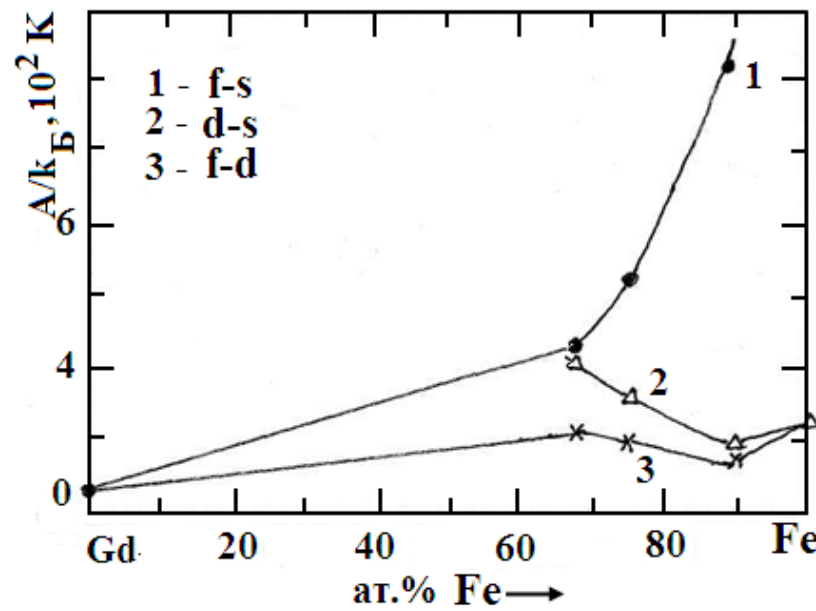
Gd-Co sistemasida, Co ning magnit momenti Gd nikidan kichik bo'lishiga qaramasdan, Co ning konsentratsiyasi 80 at.% dan kichik bo'lgan birikmalarda, d-s o'zaro ta'sir f-s- o'zaro ta'sirdan kuchliroq bo'ladi. Bu birikmalarda f-d va f-s o'zaro ta'sirlar qariyb teng kuchli bo'lib, Co konsentratsiyasi deyarlik bog'liq

emas. GdCo_5 va $\text{Gd}_2\text{Co}_{17}$ birikmalarda f-s o'zaro ta'sir, ularning magnit tartibli holatining hosil bo'lishida hal qiluvchi rol o'ynaydi. Bu birikmalarda d-s o'zaro ta'sir f-d va f-s o'zaro ta'sirlar oralig'ida joylashadi.

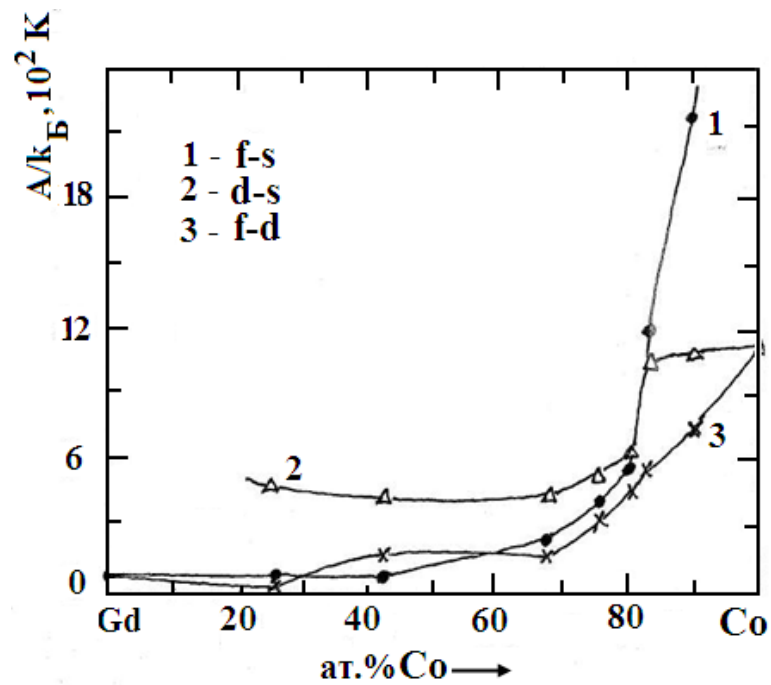
Gd-Ni sistemasida d-s o'zaro ta'sir eng kuchli hisoblanib, u Ni konsentratsiyasi oshishi bilan susayadi. f-s o'zaro ta'sir f-d va d-s o'zaro ta'sirlar oralig'ida joylashadi.

3.3 –jadval. Gd-(Fe,Co,Ni) sistemalarida amal qiladigan turli xildagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirlar parametrlarining qiymatlari.

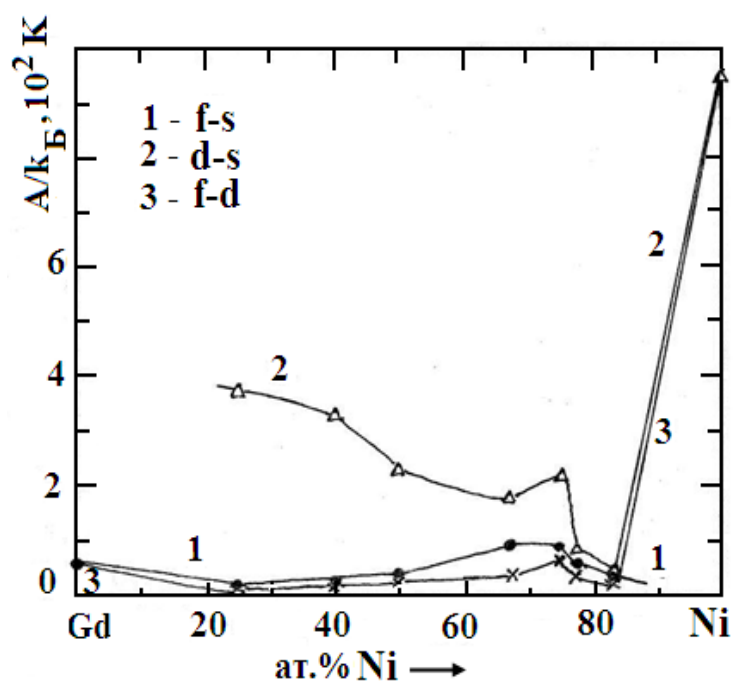
Na'muna	$A / k_B, 10^2 K$					
	f-s-bog'lanish		d-s-bog'lanish		f-d bog'lanish	
	Qattiq holat	Suyuq holat	Qattiq holat	Suyuq holat	Qattiq holat	Suyuq holat
Gd	0,596	0,653	-	-	-	-
α -Fe	-	-	3,610	-	-	-
δ -Fe	-	-	3,771	1,44	-	-
Gd ₂ Fe ₇	8,399	4,402	1,796	0,943	1,464	0,768
GdFe ₃	5,432	0,937	3,259	0,562	2,037	0,351
GdFe ₂	4,635	0,306	4,109	0,271	2,178	0,144
Co	-	-	11,264	12,384	-	-
Gd ₃ Co	0,401	0,820	5,072	10,336	0,372	0,760
Gd ₄ Co ₃	0,810	-0,590	4,537	-3,304	1,618	-0,501
GdCo ₂	2,384	0,133	4,931	0,275	1,607	0,089
GdCo ₃	3,832	4,823	5,365	6,752	2,235	2,813
GdCo ₄	5,933	2,638	6,230	2,770	3,039	1,351
GdCo ₅	12,022	5,859	10,343	5,041	5,559	2,710
Gd ₂ Co ₁₇	22,367	19,102	11,021	9,412	7,383	6,305
Ni	-	-	9,450	-14,955	-	-
Gd ₃ Ni	0,160	0,896	3,780	21,180	0,154	0,860
Gd ₃ Ni ₂	0,279	0,359	3,300	4,237	0,258	0,331
GdNi	0,297	0,697	2,340	5,490	0,264	0,619
GdNi ₂	0,456	1,172	1,769	4,545	0,363	0,932
GdNi ₃	0,866	4,137	2,260	10,860	0,623	2,996
Gd ₂ Ni ₇	0,502	0,848	1,115	1,885	0,346	0,585
GdNi ₅	0,440	7,077	0,517	8,328	0,238	3,826



3.4-rasm. Gd-Fe-sistemasida $\frac{A}{k_B}$ ning Fe konsentratsiyasiga bog'lanishlari.



3.5-rasm. Gd-Co-sistemasida $\frac{A}{k_B}$ ning Co konsentratsiyasiga bog'lanishlari.



3.6.rasm. Gd-Ni sistemasida $\frac{A}{k_B}$ ning Ni konsentratsiyasi bog'lanishlari

Uchunchi bobga doir xulosalar

1.Toza Gd, Fe, Co va Ni metallarning va gadoleniyning TGM (TGM=Fe,Co,Ni) bilan intermetallik brikmlar magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishini $[\chi(T)]$, uy temperaturasidan 1800°C temperaturalar oralig'ida, qattiq va suyuq holatlarda o'lchash natijalari bayon qilindi va nazariy jihatdan tushuntirildi.

2.O'rganilgan Gd-Co sistemasi brikmlarini $\chi(T)$ bog'lanishi qattiq holatda Nell qonuniga, suyuq holatda esa Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlandi.

Gd-Fe sistemalari brikmlarining $\chi(T)$ bog'lanish chiziqli, Gd-Ni sistemasi brikmlariniki esa umumlashgan Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlandi.

$GdCo_2$, $GdCo_3$ va Gd_4Co_3 brikmalari qattiq holatining $\chi(T)$ bog'lanishida $400 - 1100^\circ C$ temperaturalar oralig'ida issiqlik gisterezisi kuzatiladi.

3. O'rganilgan brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari, ularning erish jarayonida sezilarli o'zgarmaydi. Bu brikmalarning magnit xossasini brikmalar tarkibidagi Gd dagi 4f va TGM dagi 3d- o'troqlashgan elektronlar hosil qilishidan va ularning energetik holati erish jarayonida o'zgarmasligidan dalolat beradi.

4. O'rganilgan toza metallar va brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan ularning qattiq va suyuq holati uchun asosiy magnit xarakteristikalar - paramagnit Kyuri temperaturasi(Θ_p), Kyuri-Veyss doiyimiysi(C) va bitta Gd atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) aniqlandi.

5. Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemalaridagi namunalarning tajribaviy paramagnit Kyuri temperaturasi qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qilish mumkin bo'lgan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirlarning(f-s,f-d,d-s) parametrlari hisoblandi. Hisoblash natijalari bo'yicha Gd-Fe va Gd-Co sistemalaridagi namunalarning magnit xossasini hosil bo'lishida bilvosita f-s o'zaro ta'sir, ya'ni 4f-elektronlarning o'tkazuvchan elektronlar orqali o'zaro ta'siri, hal qiluvchi rol o'ynashi aniqlandi. Gd-Ni sistemasida d-s o'zaro ta'sir bu boradi hal qiluvchi rol o'ynaydi.

III-Bobga ilova.

O`rganilgan namunalarning asosiy paramagnit xarakteristikalarini EHM da hisoblash uchun Turbo Beysik tilida tuzilgan dastur.

10. REM

20. REM EKKU

30. INPUT

40. DIM X(N), Y(N)

50. REM X(I), Y(I)

60. FOR I=1 TO N

70. READ X(I), Y(I)

80. NEXT

FOR I=1 TO N

X(I)=X(I)*1000

NEXT

90. XX=0, YY=0: X2=0

100. FOR I=1 TO N

110. XX=XX+X(I): X2=X2+X(I)^2

120. YY=YY+Y(I): XY=XY+X(I)+Y(I)

130. NEXT

140. A=(N*XY-XX*YY)/_N*X2-XX^2)

150. $B = (X^2 * YY - XX * YY) / (N * X^2 - XX^2)$

160. $C = 1/A$; TETA = $-B/A$

170. NEXT

180. PRINT "A=" ; A:PRINT

190. PRINT "B=" ; B:PRINT

200. PRINT "C=" ; C:PRINT

210. PRINT "TETA=" ; TETA : PRINT.

Xulosalar

Ushbu magistrlik dissertatsiyasida bajarilgan ishlarni umumlashtirib quyidagi xulosalarga kelish mumkin:

1.Dissertatsiya mavzusiga oid, bugungi kunda adabiyotlarda mavjud bo'lgan, nazariy va tajribaviy ishlar o'rganilib, ularning mazmuniga qisqacha sharh berildi.

2.Tadqiqot ob'ektlarining magnit qabul qiluvchanligini yuqori temperaturalarda o'lchash usuli, o'lchash qurilmasining tuzilishi va ishlash prinsipi bayon qilindi. O'lchash xatoligi bayon qilindi.

3.Toza Gd, Fe, Co va Ni metallarning va gadoleniyni TGM ($TGM=Fe,Co,Ni$) bilan intermetallik brikmalar magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog'lanishini $[\chi(T)]$, uy temperaturasidan $1800^{\circ}C$ temperaturalar oralig'ida, qattiq va suyuq holatlarda o'lchash natijalari bayon qilindi va nazariy jihatdan tushuntirildi.

4.O'rganilgan Gd-Co sistemasi brikmalarini $\chi(T)$ bog'lanishi qattiq holatida Nell qonuniga, suyuq holatda esa Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlandi.

Gd-Fe sistemalari brikmalarining $\chi(T)$ bog'lanish chiziqli, Gd-Ni sistemasi brikmalariniki esa umumlashgan Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinishi aniqlandi.

$GdCo_2, GdCo_3$ va Gd_4Co_3 brikmalari qattiq holatining $\chi(T)$ bog'lanishida $400 - 1100^{\circ}C$ temperaturalar oralig'ida issiqlik gisterezisi kuzatiladi.

5. O'rganilgan brikmalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari, ularning erish jarayonida sezilarli o'zgarmaydi. Bu brikmalarning magnit xossasini brikmalar tarkibidagi Gd

dagi 4f va TGM dagi 3d- o'troqlashgan elektronlar hosil qilishidan va ularning energetik holati erish jarayonida o'zgarmasligidan dalolat beradi.

6. O'rganilgan toza metallar va brikmalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlaridan ularning qattiq va suyuq holati uchun asosiy magnit xarakteristikalar - paramagnit Kyuri temperaturasi(Θ_p), Kyuri-Veyss doymiysi(C) va bitta Gd atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) aniqlandi.

7. Gd-TGM (TGM=Fe,Co,Ni) sistemalaridagi namunalarning tajribaviy paramagnit Kyuri temperaturasi qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qilish mumkin bo'lgan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirlarning(f-s,f-d,d-s) parametrlari hisoblandi. Hisoblash natijalari bo'yicha Gd-Fe va Gd-Co sistemalaridagi namunalarning magnit xossasini hosil bo'lishida bilvosita f-s o'zaro ta'sir, ya'ni 4f-elektronlarning o'tkazuvchan elektronlar orqali o'zaro ta'siri, hal qiluvchi rol o'ynashi aniqlandi. Gd-Ni sistemasida d-s o'zaro ta'sir bu boradi hal qiluvchi rol o'ynaydi.

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. Буравихин В.А., Егоров В.А. Кристаллические структуры редкоземельных интерметаллидов. Иркутск, 1976.– 280 с.
9. Van Flack J.H. The theory of electric and magnetic suscrtibilities. – Oxford: Univ. pess, 1932 – 384p.
- 10.Сельвуд П.И. Магнетохимия. – М.: И.Л. 1958 – 460с.
- 11.Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений.-М.: Изд-во МГУ,1976.-367 с.
- 12.Kriessman C.J.,MoGuire T.H. The Magnetic susceptibilities of Hafnium,Gadolinium and Manganese//Phya.Rev..–1953.Vol.90.–N2.–p374.
- 13.Arajs S. and Colvin R.V. Paramagnetism of Polycrystalline Gadolinium, Terbium and Dysprosium Metals// J. Appl. Phys..– 1961.– Vol.32.– №3.– pp. 336S -337S.

14. Müller M., Huber E., Güntherodt H.J. Magnetic susceptibility of liquid heavy Rare Earth Metals//J.de Physique.— 1979.— Т.40.— Suppl.N5.—pp. c5-260-c5-261.
15. Кувандиков О.К., Шакаров Х.О., Усанов Ш.Х., Хамраев Н.С. Магнитная восприимчивость интерметаллидов в системе Gd-In при высоких температурах//Известия вузов.— физика.— 1988.— №7.— с.115-116.
16. Андропов В.А. Магнитная восприимчивость и электронная структура бинарных сплавов кобальта, никеля с некоторыми нормальными металлами при высоких температурах: Канд. Диссертация.— Свердловск, 1977.
17. Невзорова Э.Г. Исследование парамагнитных свойств твердых и жидких сплавов железа с кремнием, германием, алюминием и углеродом: Канд. диссертация.— Свердловск, 1973.
18. Terry E.M. The magnetic properties of iron, nickel and cobalt above the Curie point and Reenson's quantum theory of magnetism//Phys.Rev.—9.— 1977.— pp.394-413.
19. Довгопол С.Г., Радовский И.З., Гельд Г.В. Влияние плавления на магнитные характеристики железа, кобальта и никеля//ДАН СССР. — 212. —1973. —с.83-85.
20. Вертман А.А., Самарин А.М. Магнитная восприимчивость никеля, кобальта и железа при высоких температурах в жидком состоянии//ДАН СССР.— 134.— 1960.— с.326-329.
21. Невзорова Э.Г., Гальтеков Б.П., Радовский И.З., Гельд П.В. Магнитная восприимчивость никеля и железа при высоких температурах//Изв.ВУЗов.— Черная металлургия.— № 9.— 1972.— с.108-109.

22. Kuvandikov O.K., Shakarov H.O., Salakhitdinova M.K. Magnetic properties of intermetallics of REM-TM systems of high temperatures//Uzbek journal of physics. – 2001.– v.3.– №1-2.– pp.67-74.
23. Никитин С.А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов.- М.: Изд-во МГУ, 1989. - 248 с.
24. Buschov K.H.J. Intermetullic Compounds of rare – earth and 3d transition metals// – Rep. Prog. Phys.-1977, vol. 40.-pp.1177-1256.
25. Wallace W.E. Magnetism of intermetallic compounds//Prog. Sol. Stat. Chem. –1971. –v.6. –pp. 170-179.
26. Arajss S., Colvin R.V. Effect of iron impurity on the magnetic susceptiviliti of gadolinium of elevated temperatures//J. Less. Common Metals.– 1964.– 7. –5. –pp.336-340.
27. Azoulay J., Ley L. The magnetic moment of iron in Gd-Fe intermetallic compounds//Sol. Stat. Com..– 1979.– v.31.– №3.– pp.131-134.
28. Burzo E. Magnetic properties of the intermetallic compounds in the gadolinium – cobalt system//Rev. Roum. Phys.– 1970.– 15.– №5.– pp.573-585.
29. Burzo E. Paramagnetic Behavior of some intermetallic compounds in the gadolinium –Cobalt system//Rev. Roum. Phys.– 1970.– 15.– №6.– pp. 689-694.
30. Burzo E., Pop T., Tchetchernikov V.J. Le Ferromagnetisme du compose intermetallique Co_2Gd //Colloq.int. CNRS.– 1970.– №180/2.– pp.87-92.
31. Burzo E. Paramagnetic Behavior of soul rare-larch cobalt compounds//Phys.Rev.B. – 1972. –V.6.– №7.– pp.2882-2887.
32. Talik E., Szade J., Leeimann J., Winiaroka Uimarski A., Chelkovski A. X-ray examination, electrical and magnetic properties of R_3Co single crystal

- (R=Y, Gd, Dy and Ho)//J. Less. Com. Metals.– 1988.– 138.– №1.– pp. 129-136.
- 33.Burzo E., Laforest J. Sur la comportement magnetique du nickel dan des composes avec le gadolinium//C.r. Acad. Sci.– 1972.– 274.– №2.– pp.B114-B117.
- 34.Koon N.C. Magnetic excitations in rare earth–transition metals//J. Magn. and Magn. Mater.–1980.– 15.– pp.349-350.
- 35.Cyrot M., Gignoux D., Givrd F., Lavayna M.//Magnetism of the rare-earth-3d-metal.–1979.– 40.– Colloq. №5.– pp.171-176.
- 36.Radwaski R.Y., Franse J.J.M., Verhoef R. Magnetic interaction in 3 d- 4 f compound.//J. Magn. and Magn. Mater.– 1999.– 83.– №1-3.– pp.127-129.
- 37.Чечерников В.И. Магнитные измерения.–М.:Изд-во МГУ.– 1969.–388с.
- 38.Вертман А.А. Смарин А.Н. «Измерение магнитной восприимчивости жидких металлов». // Завдск. лаб. 1958, с. 309-310.
- 39.Кувондигов О.К., Шакаров Х.О. Методы измерение некоторых физических величин в общем курсе физики.// Руководство для НИРС и УИРС. – Самарканд. Изд. СамГУ, 1984. – 45с.
- 40.Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллических соединений лантаноидов с индием при высоких температурах.// Кандидатская диссертация, Самарканд, 1983.
- 41.Кувондигов О.К., Шакаров Х.О., Иргашев К.М. Высокотемпературная установка для измерение магнитная восприимчивость 3d и 4f – металлов в твердом и жидком состояниях.//В.Сб.:Оптикоакустические, электрические, магнитные исследование конденсированных сред. – Самарканд, Изд. СамГУ, 1982. – с.122-130.
- 42.Kuvondikov O.K., Shakarov X.O., Shodiyev Z.M., Rustamov A. Analisis of the magnetic properties of (La_{1-x} Sr_x)_{0.93} K_x MnO₃ manganities at high

- temperatures.// Journal of communications technology and elektronies. 2007, vol. 52, No.9. – p. 1058-1061.
43. Неель Л. Магнитные свойства ферритов. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Сборник статей “Антиферромагнетизм”//под ред. С.В. Вонсовского. –М.: Из-во ИЛ, 1956.– с.56-84.
44. Шакаров Х.О., Усмонов Б.Н. Применение микро ЭВМ в НИРС по физике. Методические рекомендации. Самарканд, Изд. СамГПИ, 1959. – 37с.
45. 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.
46. О.К.Кувондигов, Х.О.Шакаров, Б.У.Амонов, Х.Исмоилов. Полиэмпирическое исследование косвенного обменного взаимодействия в системах Gd-ЭГЖ (ЭГЖ=Fe,Co,Ni). “Замонавий физиканинг долзарб муаммолари” Республика илмий конференцияси материаллар тўплами, Бухоро – 2012, 30.11.12- 1.12.12, 16-18 бетлар.
47. О.К. Кувандигов, Х.О. Шакаров, З.М. Шодиев, Б.У. Амонов, Х. Исмоилов. Полуэмпирическое исследование косвенного обменное взаимодействие в системе Gd-ЭГЖ (ЭГЖ=Fe,Co,Ni). – СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси, 2013, №3(79), сс.42-47.