

**BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

AHADOV ABDULLO AMRULLOJON O'G'LI

**KAZIMIR-KEMPF MODELIDAN FOYDALANILGANDAGI KUPRATLI
YUQORI HARORATLI O'TA O'TKAZGICHLAR PARAMETRLARINING
BOSIM TA'SIRIDAGI O'ZGARISHLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2026

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) in
physical and mathematical sciences**

Ahadov Abdullo Amrullojon o'g'li

Kazimir-Kempf modelidan foydalanilgandagi kupratli yuqori haroratli o'ta
o'tkazgichlar parametrlarining bosim ta'siridagi o'zgarishlari3

Ахадов Абдулло Амрулложон угли

Изменение параметров высокотемпературных купратных сверхпроводников
под действием давления при использовании модели Казимира-Кемпфа.....21

Ahadov Abdullo Amrullojon ogli

Pressure-induced variation of the parameters of high-temperature cuprate
superconductors within the Casimir–Kempf model43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....48

**BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

AHADOV ABDULLO AMRULLOJON O'G'LI

**KAZIMIR-KEMPF MODELIDAN FOYDALANILGANDAGI KUPRATLI
YUQORI HARORATLI O'TA O'TKAZGICHLAR PARAMETRLARINING
BOSIM TA'SIRIDAGI O'ZGARISHLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2025.4.PhD/FM1419 raqami bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Buxoro Davlat Universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.buxdu.uz) va «Ziyonet» axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Djurayev Davron Rahmonovich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Yavidov Bahram Yangibaevich fizika-matematika fanlari doktori, dotsent Sharopov Utkirjon Bahodirovich fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
Yetakchi tashkilot:	O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Yadro fizikasi instituti

Dissertatsiya himoyasi Buxoro Davlat Universiteti huzuridagi PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil 7-iyul soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 200117, Buxoro shahar, M. Iqbol ko'chasi 11-uy. Tel. (+99865) 221-30-46; факс (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro Davlat Universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (934 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 200117, Buxoro shahar, M. Iqbol ko'chasi 11-uy. Tel. (+99865) 221-30-46).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil "25" iyun kuni tarqatildi.
(2026-yil "25" iyun dagi 1 raqamli reestr bayonnomasi)



M.Z. Sharipov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi, f-m.f.d. (DSc), professor

A.A. Turayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f-m.f.d. (PhD), professor

Sh.A. Raximov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi,
f-m.f.d. (DSc), professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik (YuHO'O') hodisasining fizik mohiyatini chuqur anglash, uning yuzaga kelish mexanizmlarini aniqlash hamda yuqori samaradorlikka ega yangi materiallarni yaratish orqali energiya yo'qotishlarini kamaytirish va energiya tejamkor texnologiyalarni rivojlantirish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan materiallar va simlar bozori 2024-yilda 1,23 mlrd AQSH dollarini tashkil etib, 2030-yilga borib 2,07 mlrd AQSH dollariga yetishi hamda yiliga o'rtacha 9,1% o'sishi prognoz qilinmoqda¹, bu esa O'zbekistonda 2030-yilgacha sanoatda energiya samaradorligini kamida 20% ga oshirish, YAIM birligiga to'g'ri keladigan energiya sarfini 30% ga kamaytirish va qayta tiklanuvchi energiya ulushini 30-40% gacha yetkazishga qaratilgan qarorlar doirasida YuHO'O' hodisasini energiya tejamkor texnologiyalar uchun dolzarb ilmiy yo'nalish sifatida tadqiq etish zarurligini ko'rsatadi².

Jahonda kupratli o'ta o'tkazgichlarning kristall tuzilishi, elektron holatlari, magnit xossalari, kritik harorati va tok zichligi kabi asosiy fizik parametrlarini chuqur o'rganishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar keng ko'lamda olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda istiqbolli nazariy yondashuvlardan biri Kazimir-Kempff modeli bo'lib, u kupratli o'ta o'tkazgichlarda nanoo'lchamli mis-oksidi qatlamlari orasida yuzaga keladigan vakuum fluktuatsiyalari natijasida hosil bo'luvchi Kazimir energiyasining o'ta o'tkazuvchanlik kondensatsiya energiyasi bilan taqqoslanadigan darajada bo'lishi mumkinligiga asoslanadi. Mazkur model kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlik holatining shakllanish mexanizmini tushuntirishda muhim nazariy asoslardan biri sifatida qaraladi. Hozirgi kunga qadar barcha kupratli o'ta o'tkazgichlarda kuzatiladigan o'ta o'tkazuvchanlik xossalari yagona mexanizm asosida to'liq tushuntirib bera oladigan mukammal nazariyaning mavjud emasligi ushbu yo'nalishda bir qator fundamental ilmiy muammolar hanuzgacha o'z yechimini topmaganligini ko'rsatadi. Shu sababli mavjud nazariy yondashuvlarni, jumladan Kazimir-Kempff modelini ham chuqur tahlil qilish, ularni takomillashtirish hamda yangi ilmiy g'oyalar asosida tadqiqotlar olib borish kupratli o'ta o'tkazgichlar fizikasining eng dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi.

Respublikamizda energiya tejamkor qurilmalardan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish va ularni amalda qo'llash bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasida "... sanoat tarmoqlarida yo'qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish bo'yicha "yashil iqtisodiyot"ga o'tish va energiya tejamkorligini ta'minlash..."³ bo'yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarda tashqi bosim ta'sirida kristall panjara parametrlari, mis oksidi qatlamlari orasidagi masofa,

¹<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/superconducting-wire-market-report>

²O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 2-dekabrda PQ-436-sonli "2030-yilgacha O'zbekiston Respublikasining 'yashil' iqtisodiyotga o'tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori

³O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarda yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

zaryad tashuvchilarning o'zaro ta'sir mexanizmlarida yuzaga keladigan o'zgarishlarning kritik harorat, kondensatsiya energiyasi, zaryad zichligi va boshqa muhim o'ta o'tkazuvchanlik parametrlariga ta'sirini Kazimir-Kempff modeli asosida tadqiq etish hamda bosim, qatlamlararo masofa, Kazimir energiyasi va o'ta o'tkazuvchanlik parametrlarining o'zaro bog'liqliklarini aniqlash muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 13-fevraldagi PQ-2772-sonli "2017-2021-yillarda elektrotexnika sanoati boshqaruvini jadal rivojlantirish va diversifikatsiyalashni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026 - yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmoni, hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlarga mosligi. Dissertatsiya ishi bo'yicha tadqiqotlar respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. "Energetika, energotejamkorlik va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishiga mos keladi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Zamonaviy tadqiqotlar usullarini qo'llagan holda kupratlardagi kuchli korrelyatsiyalar, qatlamli kristall tuzilma, spin va fonon dinamikasi hamda bosim ostidagi o'zgarishlarni o'rganish kabi masalalarni hal qilishda bir qator taniqli xorijiy olimlar katta hissa qo'shganlar, jumladan: C.W. Chu (AQSh), J.S. Schilling (Germaniya), L. Gao (Xitoy), H.K. Mao (AQSh), J.L. Tallon (Yangi Zelandiya), V.Z. Kresin (AQSh), C. Meingast (Germaniya), N. Barišić (Xorvatiya), R. Khasanov (Shveytsariya), A. Yamamoto (Yaponiya), H. Sakakibara (Yaponiya), J.B. Zhang (Xitoy), J. Zhao (Xitoy), W. Yang (Xitoy), M. Mito (Yaponiya), H.-H. Kim (Janubiy Koreya), S.G. Ovchinnikov (Rossiya), K.A. Sidorov (Rossiya), S. Tsankov (Bolgariya) va boshqalar.

Kupratli o'ta o'tkazgichlarning turli fizik xossalarini o'rganish va ularning nazariy asoslarini takomillashtirishda O'zbekistonning taniqli olimlari S. Djumanov, D.R. Djurayev, B.Y. Yavidov hamda E.M. Ibragimova tomonidan olib borilgan ilmiy tadqiqotlar muhim ahamiyat kasb etib, mazkur izlanishlar natijasida yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikning fizik xossalarini tadqiq etish yo'nalishida salmoqli ilmiy natijalarga erishilgan.

Shu bilan birga, bosim ostida kupratlardagi o'ta o'tkazuvchanlik xossalarini tushuntirishda kuchsiz va kuchli elektron-fonon ta'sirlashuvi, Ginzburg–Landau yondashuvi, rezonansli valent bog'lanishlar modeli, spin-fluktuatsiyalar nazariyasi hamda Hubbard modeli kabi qator nazariy yondashuvlardan foydalanilmoqda. Biroq ushbu modellarda gidrostatik va bir o'qli bosim ostida o'ta o'tkazuvchanlik hamda uni tavsiflovchi fizik kattaliklarning miqdoriy o'zgarishlari o'rtasidagi bog'liqliklar yetarli darajada o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Buxoro davlat universiteti ilmi-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida" gi Farmoni ijrosini ta'minlash doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarda bosim ta'sirida o'zgaradigan asosiy o'ta o'tkazuvchanlik parametrlari, ya'ni kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massasi va magnit maydonining London singish chuqurligi orasidagi bog'lanishlarni Kazimir-Kempff modeli asosida nazariy jihatdan tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari quyidagilardan iborat:

Kazimir energiyasi va Kempffning minimal uzunlik modeli asosida yuqori haroratli kuprat o'ta o'tkazgichlarda kritik haroratning bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini ifodalovchi tenglamalarni keltirib chiqarish va bir o'qli bosimning anizotrop ta'sirini tavsiflovchi nazariy model ishlab chiqish;

Kazimir-Kempff modeli asosida yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim bo'yicha hosilalari tenglamalarini keltirib chiqarish va kristall panjaraning turli yo'nalishlari bo'yicha beriladigan bosim effektiv massaga anizotrop ta'sirini nazariy asoslash;

Hg-12(n-1)n kupratlar zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlarini hisoblash, kristall panjarasining a (c)-o'qi bo'yicha yo'nalgan bosim ta'sirida effektiv massa o'zgarishi va bir o'qli bosim ostida kritik haroratning anizotrop o'zgarishi orasidagi bog'liqlikni Kazimir-Kempff modeli asosida tushuntirish;

Hg-12(n-1)n va Y-123 kupratlar kritik haroratning bir o'qli va gidrostatik bosim ostida o'zgarishini Kazimir-Kempff modeli asosida hisoblash, bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlik parametrlarining bir-biriga miqdoriy bog'liqligini aniqlash;

magnit maydon singishining London chuqurligi, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massasi o'zgarishlarining gidrostatik bosim ostidagi bog'liqliklarini Kazimir-Kempff yondashuvi asosida aniqlash va London singish chuqurligi va effektiv massaning kritik haroratga ta'sirini nazariy asoslash;

tashqi bosim berilganda Y-124 o'ta o'tkazgichdagi kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massa va London singish chuqurligi kabi parametrlarning o'zgarishini Kazimir-Kempff modeli asosida hisoblash, ideal va noideal Kazimir effektlarining kritik haroratga ta'sirlarini taqqoslash.

Tadqiqotning ob'yektini CuO₂ qatlamlar, Hg-12(n-1)n, Y-123, Y-124, gidrostatik va bir o'qli bosim ostidagi o'ta o'tkazgichlar tashkil etadi.

Tadqiqotning predmeti Kazimir-Kempff modeli asosida yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarda kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi, ularning effektiv massasi hamda magnit maydonining London singish chuqurligi kabi asosiy o'ta o'tkazuvchanlik parametrlarining tashqi gidrostatik va bir o'qli bosimga bog'liq holda o'zgarish qonuniyatlaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida Kazimir-Kempff modeli, o'ta o'tkazuvchanlikning Kazimir energiyasi yondashuvi, differensiallash va hisoblashning sonli usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marta Kazimir effektini hisobga olgan holda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar uchun kritik haroratning bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini

hisoblash tenglamalari olingan va ular orqali kritik haroratga bir o'qli bosim anizotrop ta'sirini tavsiflovchi nazariy model ishlab chiqilgan;

birinchi marta Kazimir-Kempff modeli asosida kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar effektiv massasiga bir o'qli bosim ta'sirini ifodalovchi nazariy tenglamalar keltirib chiqarilgan va ushbu tenglamalar orqali kristall panjaraning turli yo'nalishlari bo'yicha beriladigan bosim effektiv massa anizotrop ta'sir ko'rsatishi nazariy asoslangan;

birinchi marta Hg-12(n-1)n o'ta o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlari hisoblanib, effektiv massa kristall panjaraning $a(c)$ -o'qi bo'yicha yo'nalgan bosim ta'sirida kamayishi (ortishi), tajribalarda kuzatilgan kritik haroratning bir o'qli bosim ostidagi anizotrop o'zgarishi Kazimir-Kempff modeli asosida tushuntirilgan;

Hg-12(n-1)n va Y-123 o'ta o'tkazgichlar kritik haroratining bir o'qli hamda gidrostatik bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlari hisoblangan va bosim ostida zaryad tashuvchilar zichligi, ularning effektiv massasi, kristall panjara parametrlari va kritik harorat o'zgarishlari orasidagi bog'liqlik aniqlangan;

gidrostatik bosim ostida o'ta o'tkazuvchanlik kritik harorati, zaryad tashuvchilar effektiv massasi va magnit maydonining London singish chuqurligi orasidagi o'zaro bog'liqlik Kazimir-Kempff yondashuvi asosida aniqlanib, bosim ta'sirida London singish chuqurligi va effektiv massaning kamayishi kritik haroratning oshishiga olib kelishi nazariy asoslangan;

Y-124 o'ta o'tkazgichda kritik harorat, London singish chuqurligi va zaryad tashuvchilar effektiv massasining gidrostatik bosim ostidagi o'zgarishlari orasidagi bog'liqlik Kazimir-Kempff modeli asosida hisoblangan. Xususan, kritik haroratning gidrostatik bosim bo'yicha hosilaviy qiymati mis oksid qatlamlar orasida ideal Kazimir effekti ta'sirida noideal Kazimir effektiga qaraganda 4 marta katta bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Kazimir-Kempff modeli asosida gidrostatik hamda bir o'qli bosim sharoitida kupratli o'ta o'tkazgichlarda kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massa va panjara parametrlarining o'zgarishlari orasidagi o'zaro bog'liqliklarni ifodalovchi tenglamalar taklif qilindi hamda ushbu tenglamalar yordamida bosimning o'ta o'tkazuvchanlik parametrlariga ko'rsatadigan anizotrop ta'sirini miqdoriy baholash imkoniyati asoslab berilgan;

Kazimir-Kempff yondashuvi asosida yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda kritik haroratning bir o'qli bosim ta'siridagi o'zgarishini ifodalash va uning bosim bo'yicha hosilalari qiymatlarini aniqlashga mo'ljallangan yangi hisoblash usuli ishlab chiqilgan;

Hg-12(n-1)n, Y-123 va Y-124 kupratlar uchun bir o'qli va gidrostatik bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlik xossalarini mis oksid qatlamlari orasidagi Kazimir effektini hisobga olgan holda tushuntirilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi kondensirlangan holat fizikasining sinovdan o'tgan zamonaviy usullaridan foydalanish, jumladan o'ta o'tkazuvchanlik kondensatsiyasi energiyasi, Kazimir energiyasining Bordag modeli, Kempffning minimal uzunlik tenglamasi va magnit maydonining London singish chuqurligi tenglamasining Kazimir-Kempff yondashuvida o'zaro bog'lanishi va muvofiqligi, hisobiy va tajribaviy natijalarning o'zaro mos kelishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati bosim ostidagi yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar kritik haroratining o'zgarishini mis oksid qatlamlari orasidagi Kazimir ta'sirlashuv energiyasi o'zgarishi va Kempf tenglamasining bosim bo'yicha hosilalari asosida tushuntirilishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati bosim ostidagi yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar parametrlarining o'zgarishlarini aniqlash, eksperimental natijalarni tahlil qilish va o'ta o'tkazuvchan materiallarning strukturaviy parametrlarini optimallashtirish bo'yicha hisoblashlar usuli ishlab chiqilgani bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Kupratlarning bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlik parametrlari orasidagi bog'liqliklarni Kazimir-Kempf modeli asosida tadqiq etish bo'yicha olingan natijalar asosida:

Y-123 o'ta o'tkazgich kritik haroratining bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini hisoblash natijalari zaryad tashuvchilar effektiv massasining kovaklar konsentratsiyasiga bog'liqligini bipolaron modeli asosidagi hisoblashlar bilan taqqoslashda (Physica B: Condensed Matter 727, 418383, 2026) hamda zol-gel usulida sintez qilingan, noyob yer elementlari bilan legirlangan magniy va bariy alyuminat namunalarda kristall struktura, elektron tuzilish va energiyaga bog'liq parametrlar orasidagi o'zaro munosabatlarni tushuntirishda qo'llanilgan (The European Physical Journal B 99, 11, 2026);

o'ta o'tkazuvchanlikning Kazimir-Kempf modeli negizida ishlab chiqilgan zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini aniqlash uchun ishlab chiqilgan tenglamalar va ular asosida $Hg-12(n-1)n$ o'ta o'tkazgichlar zaryad tashuvchilar effektiv massasi bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarining hisoblangan qiymatlari kabi ilmiy yangiliklar Andijon davlat texnika institutida bajarilishi 2022-2023 yillarga mo'ljallangan ilmiy-tadqiqot ishlari dasturi doirasida «Katta ma'lumotlarga asoslangan intellektual (AI) qayta tiklanadigan energiya tarmoq tizimini tadqiq etish va qo'llash» mavzusidagi fundamental ilmiy tadqiqot dasturining ilmiy natijalarini taqqoslashda foydalanilgan. (Andijon davlat texnika institutining 2026-yil 4-fevraldagi № 01-03-475 sonli ma'lumotnomasi). Mazkur ilmiy natijalardan foydalanish avtomatlashgan sezuvchanlik texnologiyalari bo'yicha tadqiqotlar va integratsiyalashgan energiya ta'minoti tizimlarining avtomatlashgan sezuvchanlik sensori va katta ma'lumotlarni birlashtirishga asoslangan muvofiqlashtirishni boshqarish texnologiyasi tadqiq etish imkonini bergan;

Y-asosli kupratlarning o'ta o'tkazuvchanlik parametrlariga bosim ta'siri bo'yicha hisoblangan natijalar Rossiya Fanlar Akademiyasi V.A. Kotelnikov nomidagi radiotexnika va elektronika instituti bajarilishi 2025-2026-yillarda mo'ljallangan «Научно-технические принципы создания экологических сверхскоростных магнитолевитационных транспортных магистралей на основе высокотемпературных сверхпроводников» mavzusidagi ilmiy loyihani bajarishda foydalanilgan (Rossiya Fanlar Akademiyasi V.A. Kotelnikov nomidagi radiotexnika va elektronika institutining 2026-yil 4-martdagi № 11220-8447-651 son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish tashqi bosim ta'sirida kupratlarning o'ta o'tkazuvchanlik parametrlari o'zgarishlarini miqdoriy tahlil qilish va hisoblash natijalarini eksperimental ma'lumotlar bilan solishtirish imkonini

bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 5 ta xalqaro va respublika miqyosidagi anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 13 ta ilmiy ishlar chop etilgan. Shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalari e'lon qilish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda 8 ta maqolalar, jumladan 6 ta Scopus va Web of Science bazalaridagi jurnallarda e'lon qilingan.

Dissertatsiya ishining tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, to'rt bob, xulosa, e'lon qilingan ishlar ro'yxati, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovadan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 125 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida tanlangan mavzuning dolzarbligi va zarurati asoslangan bo'lib, olib borilgan tadqiqotning asosiy maqsadi va masalalari ifodalangan, tadqiqotning obyekt va predmeti tavsiflangan, Respublikaning fan va texnologiyalari rivojlanishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik va Kazimir effektining fundamental asoslari”** deb nomlangan birinchi bobida kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarda o'ta o'tkazuvchanlik hodisasi hamda Kazimir effektining nazariy-fundamental asoslariga bag'ishlangan ilmiy tadqiqotlar tahlil qilingan. Mazkur bobda, xususan, kupratli o'ta o'tkazgichlarning kristall tuzilishida muhim rol o'ynaydigan mis-oksidi qatlamlari orasida yuzaga keluvchi vakuum fluktuatsiyalari natijasida hosil bo'ladigan Kazimir energiyasining o'ta o'tkazuvchanlik kondensatsiya energiyasi bilan o'zaro bog'liqligi yoritilgan. Shuningdek, Kazimir energiyasining kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massa hamda boshqa o'ta o'tkazuvchan parametrlarning shakllanishiga ta'sirini baholash masalalari ushbu bobning asosiy ilmiy yo'nalishlaridan biri sifatida bayon etilgan.

Ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Kazimir-Kempfi modeli kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarda bir o'qli bosim ta'sirida kritik haroratning o'zgarishini hisoblash hamda ushbu jarayonning fizik mexanizmlarini tushuntirish imkonini beradi. Ushbu model doirasida bir o'qli bosim kristall panjara parametrlarining deformatsiyalanishiga, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massasining o'zgarishiga sabab bo'ladi. Natijada kupratli o'ta o'tkazgichlarda kritik haroratning turli kristallografik yo'nalishlar bo'yicha anizotrop o'zgarishi yuzaga keladi.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik uchun Kazimir-Kempfi modeli. Kazimir-Kempfi modelida bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlik”** deb nomlangan ikkinchi bobida yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarning fizik xossalari izohlashda Kazimir-Kempfi nazariyasining qo'llanish imkoniyatlari bayon etilgan. Bobda gidrostatik hamda bir o'qli bosim ta'sirida kupratli o'ta o'tkazgichlarda kritik haroratning o'zgarishi, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massaning bosimga bog'liqligi, shuningdek, kristall panjara parametrlaridagi

deformatsion o'zgarishlarning o'ta o'tkazuvchanlik holatiga ta'siri nazariy jihatdan asoslangan.

Ma'lumki, Kazimir effekti parallel joylashgan metall plastinkalar orasida elektromagnit maydon kvant holatlari spektrining chegaraviy shartlar ta'sirida o'zgarishi natijasida yuzaga keladi. Plastinkalar maydon uchun chegaraviy shartlarni belgilashi natijasida vakuum tebranishlarining spektri o'zgaradi. Buning oqibatida plastinkalar orasidagi va tashqarisidagi energiya zichliklari o'rtasida farq paydo bo'ladi. Ushbu farq Kazimir energiyasi deb yuritiladi va u Kazimir kuchining yuzaga kelishiga sabab bo'ladi. Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar parallel CuO_2 qatlamlardan tuzilganligi ular uchun Kazimir effekti va o'ta o'tkazuvchanlik holatlarining o'zaro bog'liqligini o'rganish imkonini beradi. Bu uchun Kazimir energiyasi bilan o'ta o'tkazuvchanlikning kondensatsiya energiyasini tenglashtirish orqali Kempf tenglamasi deb nomlanuvchi quyidagi o'ta o'tkazuvchanlik kritik harorat ifodasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$T_c = \frac{2^{1/4} \pi^{1/2} \hbar^{3/2} e^{1/2} n^{*1/4}}{10 \eta k_B m_{eff}^{*3/4} \epsilon_0^{1/4} c^{5/4}} \quad (1)$$

bu yerda, n^* va m_{eff}^* mos ravishda $n\text{CuO}_2$ tekislikdagi o'ta tok tashuvchilar zichligi va effektiv massasi, e - elektronning zaryadi, c - $n\text{CuO}_2$ tekisliklar orasidagi masofasi yoki unga deyarli teng bo'lgan kristall panjaraning vertikal doimiysi bo'lsa, $\hbar$ - Plank doimiysi, k_B - Bolsman doimiysi, ϵ_0 - vakuumning dielektrik sindiruvchanligi va $\eta = 1.76$ - BKSh parametrini bildiradi.

Agar tok tashuvchilar effektiv massasining elektronning tinchlikdagi massasi m_e ga nisbatini α bilan belgilasak, ya'ni $m_{eff}^* = \alpha m_e$ deb olsak (1) tenglamani quyidagicha qayta yozishimiz mumkin:

$$T_c = \frac{2^{1/4} \pi^{1/2} \hbar^{3/2} e^{1/2} n^{*1/4}}{10 \eta k_B \alpha^{3/4} m_e^{3/4} \epsilon_0^{1/4} c^{5/4}} \quad (2)$$

Gidrostatik bosim P ning kritik haroratga ta'sirini ifodalash (2) tenglamadan quyidagicha hosila olamiz:

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{\partial T_c}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} \quad (3)$$

(3) tenglamani kristallografik c-o'q bo'yicha siqiluvchanlikni koeffitsiyenti

$$K_c = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P} = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_c} \quad (4)$$

orqali quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{5K_c T_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} \quad (5)$$

Ma'lumki, kritik haroratning gidrostatik bosim bo'yicha hosilasiga bir o'qli bosimlar bo'yicha hosilalar yig'indisi sifatida qarash mumkin:

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{dT_c}{dP_a} + \frac{dT_c}{dP_b} + \frac{dT_c}{dP_c}$$

dT_c/dP_a , dT_c/dP_b va dT_c/dP_c larni to'g'ridan to'g'ri (3) tenglamadan keltirilib chiqariladigan quyidagi tenglamalar orqali aniqlasak bo'ladi:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_a} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_a} \quad (6)$$

$$\frac{dT_c}{dP_b} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_b} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_b} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_b} \quad (7)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_c} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_c} \quad (8)$$

(6)-(8) tenglamalarni soddaroq ko'rinishga keltirish uchun ba'zi ishlarni amalga

oshiramiz. Avvalo kristall panjaraning c-o'qini tashkil etuvchisi uchun siqiluvchanlik P va P_c bosimlarda bir xil deb olaylik. (5) tenglama, P_a va P_b bir o'qli bosimlarda kristall panjaraning c-o'qi uzunligi deyarli o'zgarmaydi deb faraz qilgan holda (6)-(8) tenglamalar quyidagicha qayta yozamiz:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_a}, \quad (9)$$

$$\frac{dT_c}{dP_b} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_b} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_b}, \quad (10)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5T_c K_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_c}. \quad (11)$$

Oxirgi tenglamalar kristall panjaraning turli o'qlari bo'yicha ta'sir etuvchi bosimlar ta'sir etganda kupratli o'ta o'tkazgichlar kritik haroratini o'zgarishini hisoblash imkonini beradi. Bunda dT_c/dP_i kattaliklarni baholashda K_c , $\partial \alpha / \partial P_i$ va $\partial n^* / \partial P_i$ larning qiymatlari ishoralarini bilish kerak bo'ladi.

Bir o'qli bosim ostida kam, optimal va o'ta legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlar uchun kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massasining o'zgarishlarini bashorat qilish bo'yicha natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

Kazimir-Kempff yondashuvi asosida bir o'qli bosim ostida kam, optimal va o'ta legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlar uchun kritik harorat, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massasining o'zgarishlarini bashorat qilish.

Legirlanish darajasi	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a}$	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_b}$	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_a}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_b}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_c}$	$\frac{dT_c}{dP_a}$	$\frac{dT_c}{dP_b}$	$\frac{dT_c}{dP_c}$	$\frac{dT_c}{dP}$
Kam	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+
Optimal	-	-	+	0	0	0	+	+	-	+
O'ta	-	-	+	-	-	-	+/-	+/-	-	+/-

Turli yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlar uchun tajribalar orqali topilgan dT_c/dP_a , dT_c/dP_b , dT_c/dP_c va dT_c/dP qiymatlar keltirilgan. Ikkala jadvalni solishtirish orqali Kazimir-Kempff modeli asosida bashort qilingan bir o'qli bosimning o'ta o'tkazuvchanlik kritik haroratiga anizotrop ta'sirini tajriba natijalariga muvofiq ekanligini ko'rish mumkin(2-jadval).

2-jadval.

Turli o'ta o'tkazgichlar uchun tajribaviy dT_c/dP_i va dT_c/dP qiymatlari, Hg-12(n-1)n o'ta o'tkazgichlar tetragonal shaklda bo'lgani uchun $dT_c/dP_a = dT_c/dP_b$.

O'ta o'tkazgich	Legirlanish darajasi	dT_c/dP_a , K/GPa	dT_c/dP_b , K/GPa	dT_c/dP_c , K/GPa	dT_c/dP , K/GPa
Hg-12(n-1)n	Optimal	2.3	2.3	-3.6	1
Bi-2212	Optimal	1.6	2.0	-2.9	0.7
Y-123	Optimal	-2.0 ± 0.2	1.9 ± 0.2	-0.3 ± 0.1	-0.3
La-214	Optimal	2.5 ± 0.9	4.9 ± 1.4	-6.8 ± 2.1	0.5

Dissertatsiyaning **“Hg-asosli kupratlarning o'ta o'tkazuvchanlik parametrlariga bosim ta'siri”** deb nomlangan uchinchi bobida Hg-12(n-1)n oilasiga mansub yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarning gidrostatik hamda bir o'qli bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlik xossalari Kazimir-Kempff modeli asosida o'rganilgan. Mazkur bobda bosim ostida kritik haroratning o'zgarishi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va effektiv massasining bosimga bog'liqligi, shuningdek, kristall panjara parametrlaridagi deformatsion o'zgarishlarning o'ta

o'tkazuvchanlik holatiga ta'siri tahlil qilingan. Natijada Hg-asosli kupratlarda bosim ta'sirida yuzaga keladigan fizik jarayonlarning o'zaro bog'liqligi va kritik haroratning anizotrop o'zgarish mexanizmlari yoritilgan.

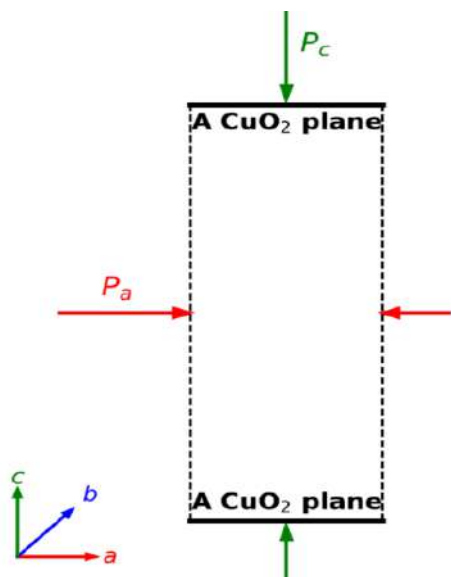
Kazimir-Kemp modeliga ko'ra gidrostatik bosim ta'siri kristall panjara o'lchamlari, zaryad tashuvchilar zichligi va effektiv massasi o'zgaradi. O'z navbatida bu kritik haroratni o'zgarishiga sabab bo'ladi. Gidrostatik bosimning ushbu kattaliklarga ta'sirlari orasidagi bog'liqlikni (3) tenglama orqali tasvirlash mumkin. Ma'lumki, barcha Hg-asosli kuprat o'ta o'tkazgichlar uchun ularga a va c o'qlar bo'yicha bir o'qli bosimlar ta'sir ettiriladi (1-rasm). Bu holda kritik haroratning gidrostatik bosim bo'yicha hosilasini bir o'qli bosimlar bo'yicha hosilalar yig'indisi orqali quyigicha ifodalanadi:

$$\frac{dT_c}{dP} = 2 \frac{dT_c}{dP_a} + \frac{dT_c}{dP_c}. \quad (12)$$

Bir o'qli bosim bo'yicha kritik harorat hosilalari dT_c/dP_a va dT_c/dP_c mos ravishda (6) va (8) tenglamalar orqali ifodalanadi. Optimal legirlanishda bosim ostida n^* juda kam o'zgarishi, gidrostatik va c -o'q bo'yicha bosimlarda c -o'q siqiluvchanliklari tengligi, c -o'q bo'yicha bir o'qli bosimda kristall panjara a doimiysini hisobga olmasa ham bo'ladigan darajada juda kichik o'zgarishini inobatga olsak (6) va (8) (yoki (9) va (11) tenglamalar ancha sodda ko'rinishga keladi:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a}, \quad (13)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5T_c K_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} \quad (14)$$



1-rasm. Ekvivalent o'tkazuvchan CuO_2 tekisliklarni Kazimir-Kemp modeli doirasida parallel plazma tekisliklar kabi sxematik ravishda tasvirlanishi. a , b , va c kristallografik o'qlarni, P_a va P_c mos ravishda a va c o'qlarga parallel yo'nalgan bir o'qli bosimlarni bildiradi.

(12)-(14) tenglamalardan tetragonal tuzilishdagi optimal legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlarga P_a , P_c va P bosimlar ta'sir etganda α parametrning o'zgarishini xarakterlovchi quyidagi tenglamalarni olamiz:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a} = -\frac{4\alpha}{3T_c} \frac{dT_c}{dP_a}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c} = \frac{5\alpha K_c}{3} - \frac{4\alpha}{3T_c} \frac{dT_c}{dP_c}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P} = 2 \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} \quad (17)$$

Biz (15)-(17) tenglamalar orqali optimal legirlanishga ega bo'lganda zaryad tashuvchilar effektiv massasiga gidrostatik va bir o'qli bosimlar ta'sirlarini qanday bo'lishini nafaqat bashorat qila olamiz balkim hisoblay ham olamiz. Buni quyida ko'rsatamiz.

O'ta o'tkazuvchanlik kritik harorati, zaryad tashuvchilar effektiv massasi va kritik haroratning gidrostatik bosim bo'yicha hosilalarining maksimal qiymatlarini

mavjud adabiyotlardagi tajriba va hisoblash ma'lumotlaridan olgan holda optimal legirlangan Hg-12(n-1)n o'ta o'tkazgichlar zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim ta'siridagi o'zgarishlari uchun hisoblangan natijalar 3-jadvalda keltirilgan. Natijalar barcha Hg-asosli kuprat o'ta o'tkazgichlarda kristall panjaraning *a*-o'q bo'yicha ta'sir etuvchi bir o'qli bosim effektiv massani kamaytirishini ($d\alpha/dP_a < 0$), *c*-o'q bo'yicha ta'sir etuvchi bir o'qli bosim esa effektiv massani oshirishini ($d\alpha/dP_c > 0$) va barcha o'qlar bo'yicha bir vaqtda berilgan bosim effektiv massani ($d\alpha/dP < 0$) kamaytirishini ko'rsatadi. Bu qiymatlar birinchi marta hisoblagan bo'lib bir o'qli bosimning zaryad tashuvchilar effektiv massaning anizotrop ta'sir etishi sababidan kritik haroratning anizotrop o'zgarishini tushuntiradi.

3-jadval.

Hg-12(n-1)n o'ta o'tkazgichlarning parametrlari.

	Hg-1201	Hg-1212	Hg-1223	Hg-1234	Hg-1245
$T_c (P = 0), K$	97	127	135	125	108
α	6.6	2.7	2.1	1.6	1.5
$K_c, 10^{-3} GPa^{-1}$	5.9	6.04	5.62	5.8	5.8
$(dT_c/dP)_{max}, K/GPa$	1.75	1.8	1.71	1.2	1.2
$dT_c/dP_a, K/GPa$	2.92	3	2.85	2	2
$dT_c/dP_c, K/GPa$	-4.07	-4.2	-3.99	-2.8	-2.8
$d\alpha/dP_a, 10^{-3} GPa^{-1}$	-265	-85	-59	-34	-37
$d\alpha/dP_c, 10^{-3} GPa^{-1}$	434	146	102	63	65
$d\alpha/dP, 10^{-3} GPa^{-1}$	-96	-24	-16	-5	-9
$d\alpha/\alpha dP, 10^{-3} GPa^{-1}$	-14.5	-8.9	-7.6	-3.1	-6

(12) tenglamaga analogik ravishda zaryad zichligi uchun quyidagini yoza olamiz:

$$\frac{\partial n^*}{\partial P} = 2 \frac{\partial n^*}{\partial P_a} + \frac{\partial n^*}{\partial P_c} \quad (18)$$

(13) va (14) tenglamalar optimal legirlangan va tetragonal tuzilishga ega o'ta o'tkazgichlar uchun kritik haroratning bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini sodda hisoblash imkonini beradi. Biz quyida $dn^*/dP \approx 0$ munosabatni optimal legirlangan Hg-12(n-1)n namunalari uchun o'rinli deb olamiz. Ammo kam va o'ta legirlangan namunalarda zaryad zichligi bosim ta'sirida o'zgaradi, bu holatlarda (13) va (14) tenglamalar boshqacharoq ko'rinishga ega bo'lishi mumkin.

(17) tenglamada zaryad tashuvchilar effektiv massasining gidrostatik va bir o'qli bosimlar bo'yicha o'zgarishlari orasidagi bog'liqlik mavjud. Hg-12(n-1)n o'ta o'tkazgichlarda CuO₂ tekisliklar soni oshishi yoki kristall panjara doimiysi *c* ortishi bilan zaryad tashuvchilar effektiv massasi kamayadi. Shunday kelib chiqib effektiv massa va kristall panjara doimiylari orasidagi bog'liqlikni quyidagicha ifodalaymiz:

$$\alpha = \beta_1 a - \beta_2 c \quad (19)$$

bunda β_1 va β_2 musbat koeffitsiyentlar mos ravishda kristall panjaraning *a* va *c* doimiylari va zaryad tashuvchilar effektiv massasi orasidagi bog'liqlikni ifodalaydi ($\frac{\beta_1}{\beta_2} > \frac{c}{a}$). (4) va (17) tenglamalardan effektiv massaning bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini aniqlaymiz:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a} = \beta_1 \frac{\partial a}{\partial P_a} = -\beta_1 a K_a, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c} = -\beta_2 \frac{\partial c}{\partial P_c} = \beta_2 c K_c \quad (21)$$

va nihoyat, (13), (14), (20) va (21) tenglamalardan quyidagilarni olamiz:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = \frac{3\beta_1 a K_a T_c}{4\alpha}, \quad (22)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5(\alpha - 3\beta_2 c) T_c K_c}{4\alpha} \quad (23)$$

4-jadval.

(19)-(21) tenglamalar asosida Hg-12(n – 1)n o‘ta o‘tkazgichlar uchun β_1 , β_2 va $d\alpha/dP_i$ ning hisoblangan qiymatlari.

	Hg-1201	Hg-1212	Hg-1223	Hg-1234	Hg-1245
T_c , K	97	127	135	125	111
a , Å	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
c , Å	9.5	12.7	15.8	19	22.1
K_a , 10^{-3} GPa $^{-1}$	4.26	2.94	2.57	2.42	2.28
K_c , 10^{-3} GPa $^{-1}$	5.83	6.04	5.62	5.67	5.72
α	6.6	2.7	2.1	1.6	1.5
β_1 , Å $^{-1}$	13.1	6.2	5.2	4.2	4.7
β_2 , Å $^{-1}$	1.4	0.32	0.18	0.14	0.12
$\partial\alpha/\partial P_a$, 10^{-3} GPa $^{-1}$	-217.6	-71	-52.1	-39.6	-41.8
$\partial\alpha/\partial P_c$, 10^{-3} GPa $^{-1}$	77.5	24.6	16	15.1	15.2
$\partial\alpha/\partial P$, 10^{-3} GPa $^{-1}$	-357.7	-117.4	-88.2	-64.1	-68.4

(22) va (23) tenglamalar anchayin sodda ko‘rinishga ega bo‘lib ular orqali kritik haroratning bir o‘qli bosim bo‘yicha hosilalarini hisoblashda faqatgina ikkita noma’lum β_1 va β_2 koeffitsiyentlar mavjud. Yuqorida bayon etilgan modelimizga tayangan holda Hg-12(n – 1)n o‘ta o‘tkazgichlar uchun eksperimental ma’lumotlarni (19)-(21) tenglamalarga qo‘yish orqali β_1 , β_2 va $d\alpha/dP_i$ qiymatlarni hisoblandi (4-jadval). Zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o‘qli bosim bo‘yicha hosilalari (15) va (16) tenglamalar asosida hisoblangan qiymatlari (20) va (21) tenglamalarni qo‘llashdan kelib chiqadigan natijalarga yaqin. Bu (19) tenglama ko‘rsatilgan kristall va elektron strukturalarni ifodalovchi parametrlar, ya’ni kristall panjara doimiylari va zaryad tashuvchilar effektiv massasi bir-biriga bog‘liqligini Kazimir-Kempff modeli doirasida tushuntirish mumkinligini ko‘rsatadi.

5-jadval.

Hg-12(n – 1)n o‘ta o‘tkazgichlar kritik harorati bir o‘qli va gidrostatik bosim hosilalarining Kazimir-Kempff modeli (KKM) orqali hisoblangan va boshqa adabiyotlarda (BA) hisoblangan yoki tajriba orqali topilgan qiymatlari, ^a Hardy F. *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 167002.; ^b Klehe A.K. *et al.*, Physica C. 223 (1994) 313.; ^c L. Gao *et al.*, Phys. Rev. B. 50 (1994) 4260.; ^d Cao Y. *et al.*, APS March Meeting Abstracts (1996) M12–05.

	dT_c/dP_a , K/GPa		dT_c/dP_c , K/GPa		dT_c/dP , K/GPa	
	KKM	BA	KKM	BA	KKM	BA
Hg-1201	2.4	2.4 ^a	-3.6	-3.6 ^a	1.2	1.2 ^a
Hg-1212	2.5		-3.3		1.7	1.7 ^b
Hg-1223	2.5	2.5 ^a	-3	-3 ^a	2	2 ^{a,c}
Hg-1234	2.3		-3.4		1.2	1.2 ^d
Hg-1245	2.3		-3.4		1.2	1.2 ^d

4-jadval ma’lumotlari asosida, (22) va (23) tenglamalardan foydalangan holda hisoblangan natijalar optimal legirlangan Hg-1201 o‘ta o‘tkazgich uchun F.Hardy va boshq. tomonidan aniqlangan $dT_c/dP_a = +2.4$ K/GPa, $dT_c/dP_c = -3.6$ K/GPa

va tajriba orqali topilgan $dT_c/dP = +1.2$ K/GPa, Hg-1223 o'ta o'tkazgich uchun aniqlangan $dT_c/dP_a = +2.5$ K/GPa va $dT_c/dP_c = -3$ K/GPa qiymatlarga muvofiq keladi. Qolgan Hg-asosli o'ta o'tkazgichlar uchun hisoblagan natijalar ham Hg-12($n - 1$) n o'ta o'tkazgichlar uchun adabiyotlarda ta'kidlangan $dT_c/dP_a \equiv 2.5 \pm 0.5$ K/GPa va $dT_c/dP_c \equiv -3.5 \pm 1$ K/GPa qiymatlarga, shuningdek, gidrostatik bosimning kritik haroratga hisoblangan ta'siri ham tajriba natijalarga mos keladi (5-jadval).

Dissertatsiyaning **“Gidrostatik va bir o'qli bosim ostidagi Y-asosli kupratlarning xossalari”** deb nomlangan to'rtinchi bobida Y-asosli kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlar -YBa₂Cu₃O_{7- δ} (Y-123) va YBa₂Cu₄O₈ (Y-124) birikmalarining gidrostatik hamda bir o'qli bosim ta'siri ostidagi fizik xossalari Kazimir–Kempff modeli doirasida tadqiq etilgan. Mazkur bobda bosim ta'sirida ushbu o'ta o'tkazgichlarning kritik harorati, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massasi va kristall panjara parametrlarida yuzaga keladigan o'zgarishlar nazariy jihatdan tahlil qilingan. Shuningdek, Y-123 va Y-124 kupratlarida bosimning turli kristallografik yo'nalishlar bo'yicha o'ta o'tkazuvchanlik parametrlariga ko'rsatadigan anizotrop ta'siri asoslab berilgan.

Kazimir–Kempff modeli doirasida optimal legirlangan Y-123 o'ta o'tkazgich uchun kritik haroratning bir o'qli bosim bo'yicha hosilalarini hisoblashda, avvalo, mazkur birikmaning kristall tuzilishi, zaryad tashuvchilar zichligi, effektiv massa qiymatlari, London singish chuqurligi hamda bosim ta'sirida panjara parametrlarining anizotrop o'zgarishiga oid nazariy va tajribaviy ma'lumotlarga tayaniladi:

1. Optimal legirlangan Y-123 o'ta o'tkazgichlar ustidagi dastlabki tajribalardan ma'lumki, CuO₂ tekislikdagi o'ta o'tkazuvchan tok tashuvchilar konsentratsiyasi 0.19 kovak/CuO₂ yoki 0.205 C/m^2 ga teng (P.L. Alireza et al., Phys. Rev. B 95 (2017) 100505) va u bosim ostida kichik qiymatlarga o'zgaradi. Xususan, R.P. Gupta va M. Gupta Y-123 o'ta o'tkazgich uchun ostida zaryad tashuvchilarning bir o'qli bosim ostida o'zgarishlari uchun $\partial n^*/\partial P_a = 0.0013$, $\partial n^*/\partial P_b = -0.0009$ va $\partial n^*/\partial P_c = 0.0021$ (kovak/CuO₂) · GPa va gidrostatik bosim uchun $\partial n^*/\partial P = 0.0025$ (kovak/CuO₂) · GPa qiymatlarni hisoblashdi (R.P. Gupta, M. Gupta, Phys. Rev. B 50 (1994) 9615–9618). Garchi bu natijalar $P = 0.578$ GPa gidrostatik bosim uchun olingan bo'lsa-da ularni namunaga gidrostatik/bir o'qli bosimning dastlabki bir necha GPa qiymatlari uchun o'rinli deb qaraladi.

2. Biz hisoblashlarimizda $\alpha = 1.5$ dan foydalanamiz (S.E. Sebastian et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 107 (2010) 6175–6179). Bundan tashqari bizga $\partial \alpha / \partial P_i$ qiymatlar ham kerak bo'ladi. Afsuski, Y-123 o'ta o'tkazgich zaryad tashuvchilarning effektiv massasi bir o'qli bosim ta'siri ostida qanday o'zgarishi haqida tajriba natijalari va nazariy hisoblashlar mavjud emas. Ammo R.P. Gupta va M. Gupta hisoblagan natijalarga tayangan holda optimal legirlangan Y-123 o'ta o'tkazgich zaryad tashuvchilar effektiv massasi va koeffitsiyent uchun quyidagicha xulosalarga kelish mumkin: kristall panjaraning a -o'qi bo'yicha yo'nalgan bir o'qli bosim kritik haroratni kamaytirishi, $\partial n^*/\partial P_a > 0$ munosabat va (9) tenglamaga ko'ra $\partial \alpha / \partial P_a > 0$, b -o'q bo'yicha yo'nalgan bir o'qli bosim kritik haroratni oshirishi va $\partial n^*/\partial P_b < 0$ ekanligidan (10) tenglama $\partial \alpha / \partial P_b < 0$ bo'lishini anglatadi. Xuddi shu uslubdagi tahlil orqali $\partial \alpha / \partial P_c > 0$ ekanligini topamiz. Bunga qo'shimcha

ravishda, so‘nggi nazariy tadqiqotlar gidrostatik bosim effektiv massai kichik qiymatlarga o‘zgarishini ko‘rsatadi (S.W. Tozer et al., Phys. Rev. B 110 (2024) 144508). Shularni hisobga olgan holda biz Y-123 o‘ta o‘tkazgich uchun $\partial\alpha/\partial P_a$, $\partial\alpha/\partial P_b$ va $\partial\alpha/\partial P_c$ qiymatlarini mos ravishda 0.043, -0.043 va 0.02 GPa^{-1} deb olamiz.

Yuqoridagilar va Y-123 o‘ta o‘tkazgich optimal legirlanishidagi kritik harorati 93 K, c o‘q siqiluvchanlik koefitsiyenti $4.26 \cdot 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$ ekanligidan (9)-(11) tenglamalar orqali dT_c/dP_i qiymatlari hisobladik va ularni hisoblashda qo‘llanilgan boshqa parametrlar bilan birga 6-jadvalda keltirdik. Biz optimal legirlangan Y-123 uchun olgan $dT_c/dP_a = -2 \text{ K/GPa}$, $dT_c/dP_b = 2.2 \text{ K/GPa}$, $dT_c/dP_c = 0$ va $dT_c/dP = 0.2 \text{ K/GPa}$ tajriba natijalariga aynan mos tushishi yoki juda yaqin ekanligini ko‘rish mumkin(2-rasm).

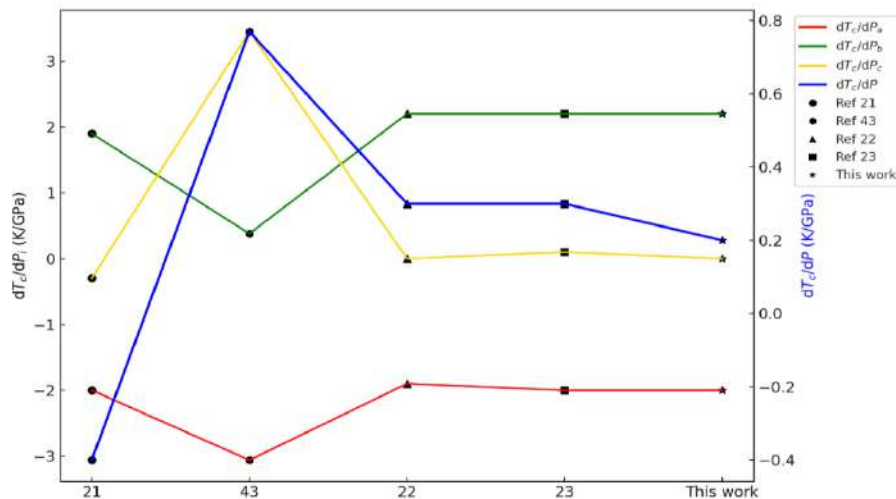
Kempf tenglamasini ((1) tenglama) tajribalardan bevosita aniqlangan kattaliklar qayta yozish uchun zaryad tashuvchilar zichligi n^* va magnit maydonining London singish chuqurligi $\lambda_{ab}(0)$ ni o‘zida mujassamlashtirgan London tenglamasining quyidagi shaklidan foydalanamiz:

$$\lambda_{ab}(0) = \frac{m_{ab}^{*1/2} c^{1/2}}{\mu_0^{1/2} n^{*1/2} q} \quad (24)$$

6-jadval.

Optimal legirlangan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123) o‘ta o‘tkazgich fizik parametrlari.

T_c, K	$K_c, 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$	$n^*, \text{C/m}^2$	α
93	4.26	0.205	1.5
$\partial n^*/\partial P_a, m\text{C/GPa} \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P_b, m\text{C/GPa} \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P_c, m\text{C/GPa} \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P, m\text{C/GPa} \cdot m^2$
1.4	-0.97	2.26	2.69
$\partial\alpha/\partial P_a, \text{GPa}^{-1}$	$\partial\alpha/\partial P_b, \text{GPa}^{-1}$	$\partial\alpha/\partial P_c, \text{GPa}^{-1}$	$\partial\alpha/\partial P, \text{GPa}^{-1}$
0.047	-0.05	0.016	0.013
$dT_c/dP_a, \text{K/GPa}$	$dT_c/dP_b, \text{K/GPa}$	$dT_c/dP_c, \text{K/GPa}$	$dT_c/dP, \text{K/GPa}$
-2	2.2	0	0.2



2-rasm. Optimal legirlangan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123) o‘ta o‘tkazgich kritik haroratining gidrostatik va bir o‘qli bosim bo‘yicha hosilalarining tajribalarda aniqlangan va Kazimir-Kempf modeli orqali hisoblangan qiymatlari.

(1) va (24) tenglamalardan quyidagi ifodani olish qiyin emas:

$$T_c = \frac{0.1\pi^{1/2}\hbar^{3/2}c_l^{1/2}}{2^{1/4}\eta k_B m_{ab}^{*1/2}\lambda_{ab}^{1/2}(0)c} \quad (25)$$

bu yerda, c_l yorug‘likning vakuumdagi tezligini ifodalaydi. (25) tenglama Kazimir-Kempff modelini tajribalardan aniqlanadigan $\lambda_{ab}(0)$, m_{ab}^* , and c kattaliklar orqali ifodalaydi.

O‘ta o‘tkazuvchanlik kritik haroratiga bosimni ta’sini aniqlash uchun (25) tenglamadan gidrostatik bosim P bo‘yicha hosila olamiz:

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{\partial T_c}{\partial \lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial P} \quad (26)$$

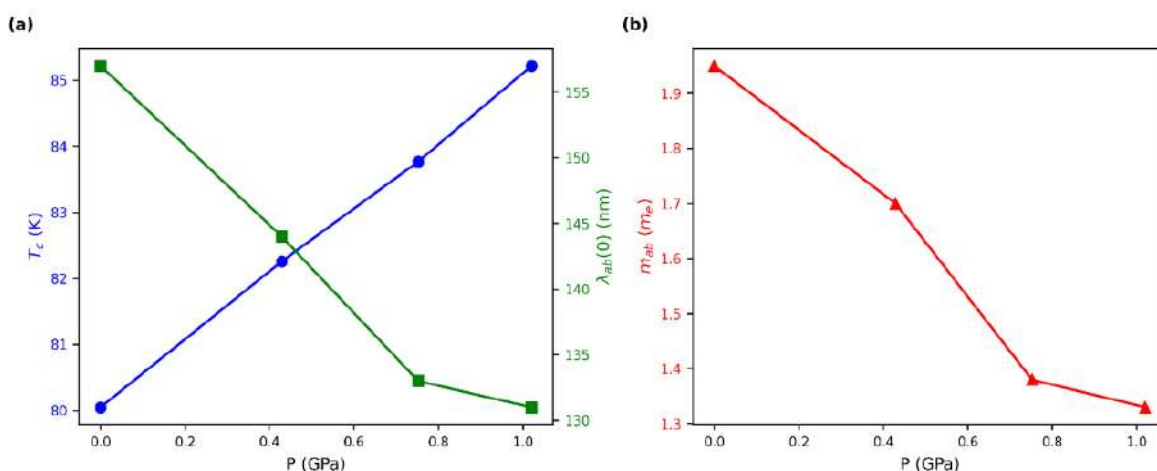
(26) ni (25) orqali quyidagicha qayta yozish mumkin:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} - \frac{T_c}{c} \frac{\partial c}{\partial P} \quad (27)$$

(4) va (27) tenglamalardan quyidagi kelib chiqadi:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + K_c T_c \quad (28)$$

R. Khasanov va boshq. tomonidan tashqi gidrostatik bosim ostida Y-124 o‘ta o‘tkazgichning kritik harorati, magnit maydonining London singish chuqurligi va zaryad tashuvchilar effektiv massasining o‘zgarishlari bo‘yicha olingan tajriba natijalarida 1.02 GPa gacha bosimda kritik harorat 80.05 K dan 85.22 K oshgan bo‘lsa, magnit singish chuqurligi 157 nm dan 131 nm ga kamaygan, effektiv massa esa 32 % ga kamaygan (R. Khasanov et al., J. Phys.: Condens. Matter. 17 (15) (2005) 2453). Shu o‘rinda biz atmosfera bosimi holati uchun (25) tenglamaga $T_c = 80.05$ K, $\lambda_{ab}(0) = 157$ nm va $c = 2.72$ nm qo‘ysak $m_{ab}^* = 1.95m_e$ ni olamiz. Bu natija tajribada aniqlangan $(2.7 \pm 0.3) m_e$ (A.F. Bangura et al., Phys. Rev. Lett. 100 (4) (2008) 047004) va Kempff tenglamasi asosida nazariy hisoblangan $1.5m_e$ (M.T.D. Orlando et al., Phys. Lett. A 382 (22) (2018) 1486–1491) natijalarga yaqindir. Biz R. Khasanov va boshq. tajribalarida $P = 0$ da zaryad tashuvchilar effektiv massasini $1.95m_e$ deb olsak $P = 1.02$ GPa da u $1.33m_e$ gacha kamaygan bo‘ladi. Xullas, yuqoridagi tajribaga ko‘ra $d\lambda_{ab}(0)/dP = -25.5$ nm/GPa va $dm_{ab}^*/dP = -0.61 m_e/\text{GPa}$ (3-rasm). Biz bu natijalarni va $K_c = 4.5 \times 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$ ni (28) tenglamaga qo‘ysak $dT_c/dP = 19.4$ K/GPa chiqadi, bu tajriba natijasi 5 K/GPa dan tahminan 4 marta katta ekanligini bildiradi.



3-rasm. Khasanov va boshq. tomonidan YBa₂Cu₄O₈ (Y-124) o‘ta o‘tkazgich ustida o‘tkazilgan 1.02 GPa gacha bo‘lgan gidrostatik bosim ostida (a) kritik harorat va magnit maydonining London singish chuqurligi va (b) zaryad tashuvchilar effektiv massasining o‘zgarishi.

Turli tadqiqot guruhlar tomonidan har xil eksperimental usullar, tashqi bosim muhitlari va T_c ni aniqlash mezonlari qo‘llangan holda olingan natijalarning bir-

biriga mos kelishi Y-124 materialida o'lgangan bosim ta'siri natijalarini ishonchliligini tasdiqlaydi. Shuning uchun (28) tenglama tomonidan berilgan sezilarli darajadagi ortiqcha baholashni tasodifiy tajriba xatolari yoki namunalar farqi bilan izohlab bo'lmaydi. Aksincha, faqat ideal Kazimir effektiga asoslangan modelning Y-124 o'ta o'tkazgich uchun bosim ostida T_c ga ta'sir qiluvchi boshqa muhim mikroskopik o'zaro ta'sirlarni inobatga olmasligi to'g'ri emasligini ko'rsatadi. Ideal Kazimir ta'sirlashuvidan tashqari boshqa bosim ostidagi o'ta o'tkazuvchanlikka ta'sir ko'rsatadigan effektlarni hisobga olish uchun (29) tenglamaga bosim bo'yicha chiziqli qo'shimcha had τP ni kiritamiz:

$$T_c = \frac{0.1\pi^{1/2}\hbar^{3/2}c_l^{1/2}}{2^{1/4}\eta k_B m_{ab}^{*1/2}\lambda_{ab}^{1/2}(0)_c} + \tau P \quad (29)$$

bu yerda, τ ideal Kazimir effekti bilan bog'liq bo'lmagan o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlarining bosim ostidagi umumiy ta'sirini ifodalaydi. Bu ta'sirlarga panjara tebranishlarining (fononlarning) o'zgarishi, strukturaviy sohalararo zaryad ko'chishining bosim ostida kuchayishi yoki elektron ekranlanishining o'zgarishi kiritish mumkin. Chiziqli bog'lanish haqidagi faraz o'rganilayotgan bosim diapazonida birinchi tartibli yaqinlashuv (first-order approximation) sifatida asosli hisoblanadi. (29) ni differensiallab o'ta o'tkazuvchanlik kritik haroratining gidrostatik bosim bo'yicha hosila uchun yangi ifoda olamiz:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + K_c T_c + \tau \quad (30)$$

(30) tenglama endi ideal Kazimir effekti hissasini (birinchi uch had) fenomenologik tuzatma τ dan aniq ajratib ko'rsatadi. Bu yondashuv vakuum fluktuatsiyasi kuchlarining bosimga sezgirlikka qo'shgan hissasini panjara va zaryad zanjirlar tuzilishiga bog'liq ta'sirlardan alohida baholash imkonini beradi va natijada dT_c/dP ni shakllantiruvchi mexanizmlarning nisbiy ahamiyatini aniqlashni osonlashtiradi. (30) tenglamani tajribada o'lgangan dT_c/dP qiymatlariga moslashtirish natijasida $\tau = -14.4$ K/GPa teng ekanligi aniqlandi. Ushbu qiymat bosim ta'sirida kritik haroratning o'zgarishini Kazimir-Kempff modeli doirasida miqdoriy tavsiflash imkonini beradi(7-jadval).

7-jadval.

Y-124 o'ta o'tkazgich kritik haroratning bosim bo'yicha hosilasi dT_c/dP ning tajribaviy va nazariy usullarda aniqlangan qiymatlari.

dT_c/dP , K/GPa	Metod	Adabiyot
5.5	Gidrostatik bosim tajribasi	Bucher <i>et al.</i>
5.5	Gidrostatik bosim tajribasi	Y. Yamada <i>et al.</i>
5.0	Gidrostatik bosim tajribasi	E.N. Van Eenige <i>et al.</i>
5.5	Bir o'qli taranglik tajribasi	M.Mito <i>et al.</i>
5.5	Gidrostatik bosim tajribasi	J.J. Scholtz <i>et al.</i>
5.5	Gidrostatik bosim tajribasi	H. Takahashi <i>et al.</i>
5.0	Gidrostatik bosim tajribasi	R. Khasanov <i>et al.</i>
19.4	Kazimir-Kempff modeli ((28) tenglama asosida)	A. Ahadov & D. Dzhuraev
5.0	Kazimir-Kempff modeli ((30) tenglama asosida)	A. Ahadov & D. Dzhuraev

τ ning manfiy bo'lishi Kazimir-Kempff yondashuvida ideal Kazimir effektiga

bog‘liq bo‘lmagan qatlamlararo o‘zaro ta’sirlar bosim ostida T_c ni susaytirishini, ya’ni ideal Kazimir effekting musbat kritik haroratni oshirishdagi hissasini qisman kompensatsiya qilishini ko‘rsatadi. Y-124 o‘ta o‘tkazgichda ikki Cu-O zanjirlari mavjudligi va ularning CuO₂ qatlamlar bilan kuchli bog‘lanishi bosim ostidagi o‘ta o‘tkazuvchanlikda ham muhim rol o‘ynashi mumkin. Bosim zanjir–tekislik o‘rtasidagi zaryad taqsimotini o‘zgartirishi, zanjir kislorod atomlari bilan bog‘liq fonon tebranishlari, hamda qatlamlararo elektron ekranlanishni o‘zgartiradi. Bular va boshqa omillar ideal Kazimir effekti to‘liq hosil bo‘lishiga qarshilik ko‘rsatadi. Umuman olganda, yuqoridagilardan YuHO‘O‘ kristall va elektron strukturaga bog‘liq omillar va kvant fluktuatsiyalari o‘rtasidagi murakkab o‘zaro ta’sir natijasida ro‘y berishi va kritik haroratning bosim ostida tez o‘shishini ta’minlash uchun CuO₂ qatlamlar orasida ideal Kazimir effekti yuzaga kelishiga qulayliklar yaratish kerak ekanligi bildiradi.

XULOSA

“Kazimir-Kemp modelidan foydalanilgandagi kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlar parametrlarining bosim ta’siridagi o‘zgarishlari” mavzusida olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi natijalar olindi va xulosalar qilindi:

1. Birinchi marta Kazimir energiyasi va Kempfning minimal uzunlik modeli asosida yuqori haroratli kupratlarda kritik haroratning bir o‘qli bosim bo‘yicha hosilalarini ifodalovchi yangi tenglamalar hosil qilindi. Ular orqali kritik haroratga bir o‘qli bosim anizotrop ta’sirini tavsiflovchi nazariy model ishlab chiqildi;

2. Kazimir-Kempf yondashuvi asosida kupratli o‘ta o‘tkazgichlar uchun zaryad tashuvchilar effektiv massasiga bir o‘qli bosim ta’sirini ifodalovchi tenglamalar keltirib chiqarildi va kristall panjaraning turli yo‘nalishlari bo‘yicha beriladigan bosim effektiv massaga anizotrop ta’sir ko‘rsatishi nazariy asoslangan;

3. Hg-12(n-1)n o‘ta o‘tkazgichlarda zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o‘qli bosim bo‘yicha hosilaviy qiymatlari birinchi marta hisoblandi. Effektiv massa kristall panjaraning $a(c)$ -o‘qi bo‘yicha yo‘nalgan bosim ta’sirida kamayishi (ortishi), tajribalarda kuzatilgan kritik haroratning bir o‘qli bosim ostidagi anizotrop o‘zgarishi Kazimir-Kempf modeli asosida ko‘rsatilgan;

4. Hg-12(n-1) va Y-123 o‘ta o‘tkazgichlar kritik haroratining bir o‘qli va gidrostatik bosim bo‘yicha hosilaviy qiymatlari hisoblandi. Bir o‘qli bosim ostida ushbu namunalar kritik harorati, zaryad tashuvchilar zichligi, ularning effektiv massasi va kristall panjara parametrlari o‘zgarishlari bo‘yicha Kazimir-Kempf modeli orqali hisoblangan natijalar tajriba natijalariga mos kelishi aniqlangan;

5. Magnit maydonining London singish chuqurligi, zaryad tashuvchilar zichligi va ularning ab -tekislikdagi effektiv massa o‘rtasidagi bog‘lanishlar Kempf tenglamasi yordamida qayta yozildi va bosim ta’sirida London singish chuqurligi va effektiv massaning kamayishi kritik haroratning oshishiga olib kelishi nazariy asoslangan;

6. Y-124 namunasi o‘ta o‘tkazuvchan parametrlarining bosim ostidagi o‘zgarishlarini orasidagi miqdoriy bog‘liqliqlar Kazimir-Kempf modelini qo‘llash orqali hisoblandi va kritik haroratning gidrostatik bosim bo‘yicha hosilaviy qiymati mis oksid qatlamlar orasida ideal Kazimir effekti ta’sirida noideal Kazimir effekti qaraganda 4 marta katta ekanligi aniqlangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АХАДОВ АБДУЛЛО АМРУЛЛОЖОН УГЛИ

**ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
КУПРАТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ КАЗИМИРА-
КЕМПФА**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Бухара – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована под номером № B2025.4.PhD/FM1419 в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.buxdu.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: Джураев Даврон Рахмонович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Явидов Бахрам Янгибаевич
доктор физико-математических наук, доцент

Шаронов Уткиржон Баходирович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Институт ядерной физики Академии наук
Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится «7» июля 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 при Бухарском государственном университете (Адрес: 200117, г. Бухара, ул. М. Икбола, дом 11. Тел.: (+99865) 221-30-46; факс: факс (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского государственного университета (регистрационный номер 934) (200117, г. Бухара, ул. М. Икбола, дом 11. Тел.: (+99865) 221-30-46).

Автореферат диссертации разослан «25» июня 2026 г.

(Протокол реестра рассылки № 1 от 25 июня 2026 г.).



М. З. Шарипов

Председатель научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

А.А. Тураев

Ученый секретарь научного совета по
Присуждению ученых степеней, д.ф. ф.-м.н.
(PhD), профессор

Ш. А. Рахимов

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертация. В мире уделяется особое внимание вопросам глубокого понимания физической сущности явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), определения механизмов его возникновения, снижения потерь энергии и развития энергосберегающих технологий путем создания новых высокоэффективных материалов. В настоящее время рынок высокотемпературных сверхпроводящих материалов и проводов в 2024 году составляет 1,23 млрд долларов США, а к 2030 году прогнозируется его рост до 2,07 млрд долларов США и рост в среднем на 9,1% в год¹, что указывает на необходимость исследования явления ВТСП как актуального научного направления для энергосберегающих технологий в рамках решений, направленных на повышение энергоэффективности в промышленности Узбекистана не менее чем на 20%, снижение энергопотребления на единицу ВВП на 30% и доведение доли возобновляемой энергии до 30-40% к 2030 году².

В мире проводятся широкомасштабные научные исследования, направленные на углубленное изучение основных физических параметров купратных сверхпроводников, таких как кристаллическая структура, электронные состояния, магнитные свойства, критическая температура и плотность тока. Одним из перспективных теоретических подходов в этом направлении является модель Казимира-Кемпфа, которая основана на том, что энергия Казимира, возникающая в результате вакуумных флуктуаций между наноразмерными слоями меди-оксида в купратных сверхпроводниках, может быть на уровне, сопоставимом с энергией сверхпроводимости конденсации. Данная модель рассматривается как одна из важных теоретических основ для объяснения механизма формирования состояния сверхпроводимости в купратах. До настоящего времени отсутствие совершенной теории, которая могла бы полностью объяснить свойства сверхпроводимости, наблюдаемые во всех купратных сверхпроводниках, на основе единого механизма, показывает, что ряд фундаментальных научных проблем в этом направлении до сих пор не решены. Именно поэтому глубокий анализ существующих теоретических подходов, в том числе модели Казимира-Кемпфа, их совершенствование и проведение исследований на основе новых научных идей является одной из наиболее актуальных задач физики купратных сверхпроводников.

В нашей республике осуществляются широкомасштабные мероприятия по проведению исследований и практическому применению новых технологий, способствующих широкому использованию и повышению эффективности энергосберегающих установок. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы определены задачи по «переходу к «зеленой

¹ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/superconducting-wire-market-report>

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 2-dekabrda PQ-436-sonli "2030-yilgacha O'zbekiston Respublikasining 'yashil' iqtisodiyotga o'tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori

экономике» и обеспечению энергоэффективности для снижения потерь в отраслях промышленности и повышения эффективности использования ресурсов»³. При выполнении этих задач важное научно-практическое значение имеет исследование на основе модели Казимира-Кемпфа влияния параметров кристаллической решетки, расстояния между слоями оксида меди, механизмов взаимодействия носителей заряда на критическую температуру, энергию конденсации, плотность заряда и другие важные параметры сверхпроводимости под воздействием внешнего давления в купратных высокотемпературных сверхпроводниках, а также определение взаимосвязи параметров давления, расстояния между слоями, энергии Казимира и сверхпроводимости.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления ускоренным развитием и диверсификацией электротехнической промышленности на 2017-2021 годы» от 13 февраля 2017 года, Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, Указе Президента Республики Узбекистан № УП-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года» от 29 октября 2020 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Исследования по диссертационной работе выполнены в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Большой вклад в решение таких задач, как изучение сильных корреляций, слоистой кристаллической структуры, динамики спина и фононов, а также изменения под давлением в купратах с применением современных методов исследования внесли ряд известных зарубежных ученых, в частности: С.W. Chu (США), J.S. Schilling (Германия), L. Gao (Китай), Н.К. Мао (США), J.L. Tallon (Новая Зеландия), V.Z. Kresin (США), С. Meingast (Германия), N. Barišić (Хорватия), Р. Хасанов (Швейцария), А. Yamamoto (Япония), Н. Sakakibara (Япония), J.B. Zhang (Китай), J. Zhao (Китай), W. Yang (Китай), М. Mito (Япония), Н.-Н. Kim (Южная Корея), С.Г. Овчинников (Россия), К.А. Сидоров (Россия), S. Tsankov (Bolgariya) и другие.

В изучении различных физических свойств купратных сверхпроводников и совершенствовании их теоретических основ большое значение имеют научные исследования, проведенные известными учеными Узбекистана С. Джумановым, Д.Р. Джураевым, Б.Ю. Явидовым и Э.М. Ибрагимовой, в

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarda yangi O'zbekistonda rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

результате которых достигнуты значительные научные результаты в области исследования физических свойств высокотемпературной сверхпроводимости.

В то же время для объяснения свойств сверхпроводимости в купратах под давлением используется ряд теоретических подходов, таких как слабое и сильное электронно-фононное взаимодействие, подход Гинзбурга-Ландау, модель резонансных валентных связей, теория спин-флуктуаций и модель Хаббарда. Однако в этих моделях недостаточно изучены взаимосвязи между гидростатической и одноосной сверхпроводимостью и количественными изменениями характеризующих ее физических величин.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Бухарского государственного университета во исполнение Указа Президента Республики Узбекистан № УП-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года» от 29 октября 2020 года.

Целью исследования является теоретический анализ основных параметров сверхпроводимости, изменяющихся под воздействием давления в высокотемпературных купратных сверхпроводниках, то есть зависимостей между критической температурой, плотностью носителей заряда, эффективной массой и лондонской глубиной проникновения магнитного поля на основе модели Казимира-Кемпфа.

Задачи исследования состоят из следующих:

вывод уравнений, описывающих производные критической температуры по одноосному давлению в высокотемпературных купратных сверхпроводниках на основе энергии Казимира и модели минимальной длины Кемпфа, и разработка теоретической модели, описывающей анизотропное действие одноосного давления;

вывод уравнений производных эффективной массы носителей заряда высокотемпературных сверхпроводящих купратов по одноосному давлению на основе модели Казимира-Кемпфа и теоретическое обоснование анизотропного влияния давления, приложенного в разных направлениях кристаллической решетки, на эффективную массу;

расчет производных значений эффективной массы носителей заряда купратов $\text{Hg-12}(n-1)n$ по одноосному давлению, объяснение на основе модели Казимира-Кемпфа зависимости между изменением эффективной массы под воздействием давления, направленного по оси a (c) кристаллической решетки, и анизотропным изменением критической температуры под одноосным давлением;

расчет изменения критической температуры купратов $\text{Hg-12}(n-1)n$ и Y-123 под одноосным и гидростатическим давлением на основе модели Казимира-Кемпфа, определение количественной взаимосвязи параметров сверхпроводимости под давлением;

определение зависимостей изменения лондонской глубины проникновения магнитного поля, плотности носителей заряда и эффективной

массы под гидростатическим давлением на основе подхода Казимира-Кемпфа и теоретическое обоснование влияния лондонской глубины проникновения и эффективной массы на критическую температуру;

расчет изменений таких параметров, как критическая температура, плотность носителей заряда, эффективная масса и лондонская глубина проникновения в сверхпроводнике Y-124 при внешнем давлении на основе модели Казимира-Кемпфа, сравнение влияния идеальных и неидеальных эффектов Казимира на критическую температуру.

Объектом исследования являются слои CuO_2 , Hg-12 (n-1) n, Y-123, Y-124, сверхпроводники при гидростатическом и одноосном давлении.

Предметом исследования являются закономерности изменения основных параметров сверхпроводимости, таких как критическая температура, плотность носителей заряда, их эффективная масса и лондонская глубина проникновения магнитного поля в высокотемпературных купратных сверхпроводниках на основе модели Казимира-Кемпфа в зависимости от внешнего гидростатического и одноосного давления.

Методы исследования. В процессе исследования использованы модель Казимира-Кемпфа, подход энергии Казимира к сверхпроводимости, дифференцирование и численные методы расчета.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые получены уравнения для расчета одноосных производных критической температуры по давлению для высокотемпературных сверхпроводящих купратов с учетом эффекта Казимира и разработана теоретическая модель, описывающая анизотропное влияние одноосного давления на критическую температуру;

впервые на основе модели Казимира-Кемпфа выведены теоретические уравнения, описывающие влияние одноосного давления на эффективную массу носителей заряда в купратных высокотемпературных сверхпроводниках, и теоретически обосновано, что давление, приложенное по разным направлениям кристаллической решетки, оказывает анизотропное влияние на эффективную массу;

впервые рассчитаны производные значений эффективной массы носителей заряда в сверхпроводниках Hg-12 (n-1) n по одноосному давлению, объяснено уменьшение (увеличение) эффективной массы под воздействием давления, направленного вдоль оси a (c) кристаллической решетки, анизотропное изменение критической температуры, наблюдаемое в экспериментах под одноосным давлением, на основе модели Казимира-Кемпфа;

рассчитаны одноосные и производные от гидростатического давления значения критических температур сверхпроводников Hg-12 (n-1) n и Y-123 и определена зависимость между плотностью носителей заряда под давлением, их эффективной массой, параметрами кристаллической решетки и изменениями критической температуры;

определена взаимосвязь между критической температурой сверхпроводимости под гидростатическим давлением, эффективной массой

носителей заряда и глубиной лондонского поглощения магнитного поля на основе подхода Казимира-Кемпфа, теоретически обосновано, что уменьшение глубины лондонского проникновения и эффективной массы под воздействием давления приводит к увеличению критической температуры;

рассчитаны зависимости изменения критической температуры, лондонской глубины проникновения и эффективной массы носителей заряда в сверхпроводнике Y-124 при гидростатическом давлении на основе модели Казимира-Кемпфа. В частности, установлено, что значение производной критической температуры по гидростатическому давлению в 4 раза больше, чем в случае неидеального эффекта Казимира под влиянием идеального эффекта Казимира между слоями оксида меди.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

приведены уравнения, описывающие взаимосвязи между изменениями критической температуры, плотности носителей заряда, эффективной массы и параметров решетки в купратных сверхпроводниках в условиях гидростатического и одноосного давления на основе модели Казимира-Кемпфа, а также обоснована возможность количественной оценки анизотропного влияния давления на параметры сверхпроводимости с помощью этих уравнений;

разработан новый расчетный метод на основе подхода Казимира-Кемпфа, предназначенный для выражения изменения критической температуры в высокотемпературных сверхпроводящих купратах под действием одноосного давления и определения значений его производных по давлению;

объяснены одноосные и гидростатические свойства сверхпроводимости под давлением для купратов Hg-12 (n-1) n, Y-123 и Y-124 с учетом эффекта Казимира между слоями оксида меди.

Достоверность результатов исследования объясняется использованием апробированных современных методов физики конденсированного состояния, в том числе энергии конденсации сверхпроводимости, модели Бордага энергии Казимира, уравнения минимальной длины Кемпфа и уравнения лондонской глубины проникновения магнитного поля в подходе Казимира-Кемпфа, а также соответствием расчетных и экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется объяснением изменения критической температуры высокотемпературных сверхпроводящих купратов под давлением на основе изменения энергии Казимирского взаимодействия между слоями оксида меди и производных уравнения Кемпфа по давлению.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении изменений параметров высокотемпературных сверхпроводящих купратов под давлением, анализе экспериментальных результатов и разработке метода расчетов по оптимизации структурных параметров сверхпроводящих материалов.

Внедренность результатов исследования. На основе результатов, полученных при исследовании зависимостей между параметрами

сверхпроводимости купратов под давлением на основе модели Казимира-Кемпфа:

Результаты расчета производных критической температуры сверхпроводника Y-123 по одноосному давлению использованы для сравнения зависимости эффективной массы носителей заряда от концентрации пор с расчетами на основе биполярной модели (Physica B: Condensed Matter 727, 418383, 2026) и для объяснения взаимосвязи между кристаллической структурой, электронной структурой и энергетическими параметрами в образцах алюмината магния и бария, легированных редкоземельными элементами, синтезированных методом золь-гель (The European Physical Journal B 99, 11, 2026);

такие научные новшества, как разработанные уравнения для определения производных эффективной массы носителей заряда по одноосному давлению, разработанные на основе модели сверхпроводимости Казимира-Кемпфа, и рассчитанные на их основе значения производных эффективной массы носителей заряда по одноосному давлению сверхпроводников Hg-12 (n-1) p были использованы при сравнении научных результатов фундаментальной научно-исследовательской программы на тему «Исследование и применение интеллектуальной (ИИ) системы возобновляемой энергетики на основе больших данных» в рамках программы научно-исследовательских работ, рассчитанной на 2022-2023 годы, выполняемых в Андижанском государственном техническом институте. (Справка № 01-03-475 от 4 февраля 2026 года Андижанского государственного технического института). Использование этих научных результатов позволило провести исследования по автоматизированным технологиям чувствительности и технологии управления координацией, основанной на объединении сенсора автоматизированной чувствительности и больших данных интегрированных систем энергоснабжения;

результаты расчетов влияния давления на параметры сверхпроводимости Y-основных купратов были использованы при выполнении научного проекта Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук на тему «Научно-технические принципы создания экологичных сверхскоростных магнитовитационных транспортных магистралей на основе высокотемпературных сверхпроводников», рассчитанного на 2025-2026 годы (справка № 11220-8447-651 Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук от 4 марта 2026 года). Использование научных результатов позволило провести количественный анализ изменений параметров сверхпроводимости купратов под воздействием внешнего давления и сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы прошли обсуждение на 5 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ. Из них 8 статей опубликованы в научных

журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 6 в журналах баз Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 125 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** диссертации обоснованы актуальность и востребованность выбранной темы, сформулированы основные цели и задачи исследования, охарактеризованы объект и предмет исследования, показано соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования.

В первой главе диссертации под названием **«Фундаментальные основы высокотемпературной сверхпроводимости и эффекта Казимира»** проанализированы научные исследования, посвященные теоретико-фундаментальным основам сверхпроводимости в купратных высокотемпературных сверхпроводниках и эффекта Казимира. В данной главе, в частности, освещена взаимосвязь энергии Казимира с энергией конденсации сверхпроводимости, возникающей в результате вакуумных флуктуаций между медно-оксидными слоями, которые играют важную роль в кристаллической структуре купратных сверхпроводников. Также в качестве одного из основных научных направлений данной главы изложены вопросы оценки влияния энергии Казимира на формирование критической температуры, плотности носителей заряда, эффективной массы и других параметров сверхпроводимости.

Анализ научной литературы показывает, что модель Казимира-Кемпфа позволяет рассчитать изменение критической температуры в купратных высокотемпературных сверхпроводниках под воздействием одноосного давления и объяснить физические механизмы этого процесса. В рамках данной модели одноосное давление вызывает деформацию параметров кристаллической решетки, изменение плотности и эффективной массы носителей заряда. В результате в купратных сверхпроводниках происходит анизотропное изменение критической температуры по различным кристаллографическим направлениям.

Во второй главе диссертации, озаглавленной **«Модель Казимира-Кемпфа для высокотемпературной сверхпроводимости. Сверхпроводимость под давлением в модели Казимира-Кемпфа»** изложены возможности применения теории Казимира-Кемпфа при объяснении физических свойств высокотемпературных купратных сверхпроводников. В главе теоретически обосновано изменение критической температуры, плотности носителей заряда и зависимости эффективной массы от давления в купратных

сверхпроводниках под действием гидростатического и одноосного давления, а также влияние деформационных изменений параметров кристаллической решетки на состояние сверхпроводимости.

Как известно, эффект Казимира возникает в результате изменения спектра квантовых состояний электромагнитного поля между параллельно расположенными металлическими пластинами под воздействием граничных условий. В результате того, что пластинки задают граничные условия для поля, изменяется спектр вакуумных колебаний. Вследствие этого возникает разница между плотностями энергии между пластинами и за их пределами. Эта разница называется энергией Казимира и является причиной возникновения силы Казимира. Тот факт, что высокотемпературные сверхпроводящие купраты состоят из параллельных слоев CuO_2 , позволяет изучить взаимосвязь между эффектом Казимира и состояниями сверхпроводимости. Для этого, уравнивая энергию Казимира и энергию конденсации сверхпроводимости, запишем следующее выражение критической температуры сверхпроводимости, известное как уравнение Кемпфа, в следующем виде:

$$T_c = \frac{2^{1/4} \pi^{1/2} \hbar^{3/2} e^{1/2} n^{*1/4}}{10 \eta k_B m_{eff}^{*3/4} \epsilon_0^{1/4} c^{5/4}} \quad (1)$$

здесь, n^* и m_{eff}^* соответственно обозначают плотность носителей сверхтока в плоскости $n\text{CuO}_2$ и эффективную массу, e - заряд электрона; c - расстояние между плоскостями $n\text{CuO}_2$, либо практически равная ему вертикальная постоянная кристаллической решётки; $\hbar$ - постоянная Планка; k_B - постоянная Больцмана; ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума; $\eta = 1.76$ - параметр БКШ.

Если обозначить отношение эффективной массы носителей тока к массе покоя электрона m_e через α , то, полагая $m_{eff}^* = \alpha m_e$, уравнение (1) можно переписать в следующем:

$$T_c = \frac{2^{1/4} \pi^{1/2} \hbar^{3/2} e^{1/2} n^{*1/4}}{10 \eta k_B \alpha^{3/4} m_e^{3/4} \epsilon_0^{1/4} c^{5/4}} \quad (2)$$

Для выражения влияния гидростатического давления P на критическую температуру из уравнения (2) получим следующую производную:

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{\partial T_c}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} \quad (3)$$

Используя коэффициент сжимаемости кристалла вдоль кристаллографической c -оси

$$K_c = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P} = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_c} \quad (4)$$

уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{5K_c T_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P} \quad (5)$$

Известно, что производную критической температуры по гидростатическому давлению можно рассматривать как сумму производных по одноосным давлениям:

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{dT_c}{dP_a} + \frac{dT_c}{dP_b} + \frac{dT_c}{dP_c}$$

dT_c/dP_a , dT_c/dP_b и dT_c/dP_c можно определить следующими уравнениями, непосредственно выводимыми из уравнения (3)

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_a} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_a} \quad (6)$$

$$\frac{dT_c}{dP_b} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_b} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_b} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_b} \quad (7)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = -\frac{5T_c}{4} \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial P_c} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_c} \quad (8)$$

Чтобы привести уравнения (6)–(8) к более простому виду, выполним некоторые преобразования. Прежде всего предположим, что сжимаемость компоненты кристаллической решётки вдоль оси с одинакова при давлениях P и P_c . Тогда с учётом уравнения (5) и предположения о том, что при одноосных давлениях P_a и P_b длина кристаллической решётки вдоль оси с практически не изменяется, уравнения (6)–(8) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_a} \quad (9)$$

$$\frac{dT_c}{dP_b} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_b} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_b} \quad (10)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5T_c K_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} + \frac{T_c}{4} \frac{1}{n^*} \frac{\partial n^*}{\partial P_c} \quad (11)$$

Последние уравнения позволяют рассчитать изменение критической температуры купратных сверхпроводников при воздействии действующих давлений по различным осям кристаллической решетки. При этом при оценке величин dT_c/dP_i необходимо знать знаки значений K_c , $\partial \alpha / \partial P_i$ и $\partial n^* / \partial P_i$.

Результаты по прогнозированию изменений критической температуры, плотности носителей заряда и эффективной массы для малых, оптимальных и сверхлегированных купратных сверхпроводников при одноосных давлениях приведены в таблице №1.

Таблица №1.

Прогнозирование изменений критической температуры, плотности носителей заряда и эффективной массы для малых, оптимальных и сверхлегированных купратных сверхпроводников под одноосным давлением на основе подхода Казимира-Кемпфа

Степень легирования	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a}$	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_b}$	$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_a}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_b}$	$\frac{\partial n^*}{\partial P_c}$	$\frac{dT_c}{dP_a}$	$\frac{dT_c}{dP_b}$	$\frac{dT_c}{dP_c}$	$\frac{dT_c}{dP}$
Малая	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+
Оптимальная	-	-	+	0	0	0	+	+	-	+
Сверх	-	-	+	-	-	-	+/-	+/-	-	+/-

Таблица №2

Экспериментальные значения dT_c/dP_i и dT_c/dP для различных сверхпроводников, N Hg-12(n-1)n так как сверхпроводники имеют тетрагональную форму $dT_c/dP_a = dT_c/dP_b$.

Сверхпроводник	Степень легирования	dT_c/dP_a , К/ГПа	dT_c/dP_b , К/ГПа	dT_c/dP_c , К/ГПа	dT_c/dP , К/ГПа
Hg-12(n-1)n	Оптимальная	2.3	2.3	-3.6	1
Bi-2212	Оптимальная	1.6	2.0	-2.9	0.7
Y-1223	Оптимальная	-2.0±0.2	1.9±0.2	-0.3±0.1	-0.3
La-214	Оптимальная	2.5±0.9	4.9±1.4	-6.8±2.1	0.5

Для различных высокотемпературных сверхпроводящих купратов приведены экспериментально найденные значения dT_c/dP_a , dT_c/dP_b , dT_c/dP_c и dT_c/dP . Сравнивая обе таблицы, можно увидеть, что анизотропное влияние одноосного давления на критическую температуру сверхпроводимости, предсказанное на основе модели Казимира-Кемпфа, соответствует результатам эксперимента (таблица №2).

В третьей главе диссертации под названием «Влияние давления на параметры сверхпроводимости купратов на основе Hg» на основе модели Казимира-Кемпфа изучены гидростатические и одноосные сверхпроводящие свойства высокотемпературных купратных сверхпроводников семейства Hg-12 (n-1) n. В данной главе анализируется изменение критической температуры под давлением, зависимость концентрации и эффективной массы носителей заряда от давления, а также влияние деформационных изменений параметров кристаллической решетки на состояние сверхпроводимости. В результате освещены механизмы анизотропного изменения критической температуры и взаимосвязь физических процессов, происходящих под воздействием давления в Hg-основных купратах.

Согласно модели Казимира-Кемпфа, влияние гидростатического давления изменяет размеры кристаллической решетки, плотность носителей заряда и эффективную массу. В свою очередь, это приводит к изменению критической температуры. Зависимость между влияниями гидростатического давления на эти величины можно описать уравнением (3). Известно, что для всех Hg-основных купратных сверхпроводников на них действуют одноосные давления по осям a и c (рис. 1). В этом случае производная критической температуры по гидростатическому давлению выражается через сумму производных по одноосным давлениям следующим образом:

$$\frac{dT_c}{dP} = 2 \frac{dT_c}{dP_a} + \frac{dT_c}{dP_c} \quad (12)$$

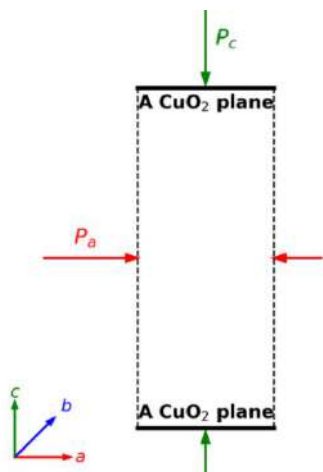


Рис. №1. Схематическое изображение эквивалентных проводящих плоскостей CuO_2 в рамках модели Казимира-Кемпфа как параллельных плазменных плоскостей. Оси a , b и c - кристаллографические оси, P_a и P_c - одноосные давления, направленные соответственно вдоль осей a и c .

Производные критической температуры по одноосному давлению dT_c/dP_a и dT_c/dP_c выражаются соответственно уравнениями (6) и (8). Если учесть, что при оптимальном легировании величина n^* под давлением изменяется весьма слабо, сжимаемости вдоль оси c при гидростатическом давлении и давлении вдоль оси c равны, а при одноосном давлении вдоль оси

с изменением постоянной кристаллической решётки a можно пренебречь ввиду его малости, то уравнения (6) и (8) (или (9) и (11)) принимают значительно более простой вид:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = -\frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} \quad (13)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5T_c K_c}{4} - \frac{3T_c}{4} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} \quad (14)$$

Из уравнений (12)–(14) получаем следующие соотношения, характеризующие изменение параметра α в оптимально легированных купратных сверхпроводниках с тетрагональной структурой при воздействии давлений P_a , P_c и P :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a} = -\frac{4\alpha}{3T_c} \frac{dT_c}{dP_a} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c} = \frac{5\alpha K_c}{3} - \frac{4\alpha}{3T_c} \frac{dT_c}{dP_c} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P} = 2 \frac{\partial \alpha}{\partial P_a} + \frac{\partial \alpha}{\partial P_c} \quad (17)$$

С помощью уравнений (15)–(17) при оптимальном легировании мы можем не только качественно предсказать характер влияния гидростатического и одноосного давлений на эффективную массу носителей заряда, но и выполнить соответствующие количественные расчёты. Ниже мы это продемонстрируем.

Результаты расчётов изменения эффективной массы носителей заряда в оптимально легированных сверхпроводниках Hg-12(n-1)n под действием одноосного давления, выполненных с использованием максимальных значений критической температуры сверхпроводимости, эффективной массы носителей заряда и производной критической температуры по гидростатическому давлению, взятых из имеющихся в литературе экспериментальных и расчётных данных, приведены в таблице 3.

Таблица №3.

Параметры сверхпроводников Hg-12(n-1)n

	Hg-1201	Hg-1212	Hg-1223	Hg-1234	Hg-1245
$T_c (P = 0), K$	97	127	135	125	108
α	6.6	2.7	2.1	1.6	1.5
$K_c, 10^{-3} GPa^{-1}$	5.9	6.04	5.62	5.8	5.8
$(dT_c/dP)_{max}, K/GPa$	1.75	1.8	1.71	1.2	1.2
$dT_c/dP_a, K/GPa$	2.92	3	2.85	2	2
$dT_c/dP_c, K/GPa$	-4.07	-4.2	-3.99	-2.8	-2.8
$d\alpha/dP_a, 10^{-3} GPa^{-1}$	-265	-85	-59	-34	-37
$d\alpha/dP_c, 10^{-3} GPa^{-1}$	434	146	102	63	65
$d\alpha/dP, 10^{-3} GPa^{-1}$	-96	-24	-16	-5	-9
$d\alpha/\alpha dP, 10^{-3} GPa^{-1}$	-14.5	-8.9	-7.6	-3.1	-6

Полученные результаты показывают, что во всех Hg-содержащих купратных сверхпроводниках одноосное давление вдоль оси (a) уменьшает эффективную массу ($d\alpha/dP_a < 0$), тогда как одноосное давление вдоль оси (c), напротив, увеличивает её ($d\alpha/dP_c > 0$), а давление, приложенное одновременно вдоль всех осей, приводит к уменьшению эффективной массы ($d\alpha/dP < 0$). Эти величины были рассчитаны впервые, и они объясняют

анизотропное изменение критической температуры тем, что одноосное давление оказывает анизотропное влияние на эффективную массу носителей заряда.

Аналогично уравнению (12) для концентрации носителей заряда можно записать следующее выражение:

$$\frac{\partial n^*}{\partial P} = 2 \frac{\partial n^*}{\partial P_a} + \frac{\partial n^*}{\partial P_c} \quad (18)$$

Уравнения (13) и (14) позволяют в упрощённой форме вычислять производные критической температуры по одноосному давлению для сверхпроводников с оптимальным легированием и тетрагональной структурой. Ниже мы будем считать соотношение $dn^*/dP \approx 0$ справедливым для оптимально легированных образцов Hg-12(n-1)n. Однако в недолегированных и перелегированных образцах плотность носителей заряда изменяется под действием давления, поэтому в этих случаях уравнения (13) и (14) могут иметь иной вид.

В уравнении (17) содержится взаимосвязь между изменениями эффективной массы носителей заряда при гидростатическом и одноосных давлениях. Известно, что в сверхпроводниках Hg-12(n-1)n с увеличением числа плоскостей CuO_2 или с ростом параметра кристаллической решётки с эффективная масса носителей заряда уменьшается. Исходя из этого, зависимость эффективной массы от параметров кристаллической решётки можно представить в следующем виде:

$$\alpha = \beta_1 a - \beta_2 c \quad (19)$$

здесь β_1 и β_2 - положительные коэффициенты, которые соответственно выражают связь между постоянной кристаллической решётки a и c и эффективной массой носителей заряда ($\frac{\beta_1}{\beta_2} > \frac{c}{a}$). Из уравнений (4) и (17) определим производные эффективной массы по одноосному давлению:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_a} = \beta_1 \frac{\partial a}{\partial P_a} = -\beta_1 a K_a \quad (20)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_c} = -\beta_2 \frac{\partial c}{\partial P_c} = \beta_2 c K_c \quad (21)$$

Таблица №4

Рассчитанные значения β_1 , β_2 и $d\alpha/dP_i$ для сверхпроводников Hg-12(n-1)n на основе уравнений (19)–(21).

	Hg-1201	Hg-1212	Hg-1223	Hg-1234	Hg-1245
T_c , K	97	127	135	125	111
a , Å	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
c , Å	9.5	12.7	15.8	19	22.1
K_a , 10^{-3} GPa^{-1}	4.26	2.94	2.57	2.42	2.28
K_c , 10^{-3} GPa^{-1}	5.83	6.04	5.62	5.67	5.72
α	6.6	2.7	2.1	1.6	1.5
β_1 , Å $^{-1}$	13.1	6.2	5.2	4.2	4.7
β_2 , Å $^{-1}$	1.4	0.32	0.18	0.14	0.12
$\partial \alpha / \partial P_a$, 10^{-3} GPa^{-1}	-217.6	-71	-52.1	-39.6	-41.8
$\partial \alpha / \partial P_c$, 10^{-3} GPa^{-1}	77.5	24.6	16	15.1	15.2
$\partial \alpha / \partial P$, 10^{-3} GPa^{-1}	-357.7	-117.4	-88.2	-64.1	-68.4

Наконец, из уравнений (13), (14), (20) и (21) получаем следующие уравнения:

$$\frac{dT_c}{dP_a} = \frac{3\beta_1 a K_a T_c}{4\alpha} \quad (22)$$

$$\frac{dT_c}{dP_c} = \frac{5(\alpha - 3\beta_2 c) T_c K_c}{4\alpha} \quad (23)$$

Уравнения (22) и (23) имеют достаточно простой вид и позволяют рассчитывать производные критической температуры по одноосным давлениям, при этом в них имеются лишь два неизвестных коэффициента β_1 и β_2 . Опираясь на изложенную выше модель, для сверхпроводников Hg-12(n-1)n были рассчитаны значения β_1 , β_2 и $d\alpha/dP_i$ путём подстановки экспериментальных данных в уравнения (19)–(21) (табл. 4).

Опираясь на изложенную выше модель, для сверхпроводников Hg-12(n-1)n были рассчитаны значения β_1 , β_2 и $d\alpha/dP_i$ путём подстановки экспериментальных данных в уравнения (19)–(21) (табл. 4). Значения производных эффективной массы носителей заряда по одноосному давлению, рассчитанные на основе уравнений (15) и (16), близки к результатам, получаемым при использовании уравнений (20) и (21). Это показывает, что в рамках модели Казимира–Кемпфа можно объяснить взаимосвязь между параметрами, характеризующими кристаллическую и электронную структуры, а именно между постоянными кристаллической решётки и эффективной массой носителей заряда, представленную в уравнении (19).

Таблица 5.

Значения производных критической температуры сверхпроводников Hg-12(n-1)n по одноосным и гидростатическому давлению, рассчитанные в рамках модели

Казимира–Кемпфа (ККМ), а также значения, рассчитанные по другим литературным данным (БА) или полученные экспериментально: ^a Hardy F. *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 167002.; ^b Klehe A.K. *et al.*, Physica C. 223 (1994) 313.; ^c L. Gao *et al.*, Phys. Rev. B. 50 (1994) 4260.; ^d Cao Y. *et al.*, APS March Meeting Abstracts (1996)

M12-05 M12-05.

	dT_c/dP_a , K/GPa		dT_c/dP_c , K/GPa		dT_c/dP , K/GPa	
	ККМ	БА	ККМ	БА	ККМ	БА
Hg-1201	2.4	2.4 ^a	-3.6	Hg-1201	2.4	2.4 ^a
Hg-1212	2.5		-3.3	Hg-1212	2.5	
Hg-1223	2.5	2.5 ^a	-3	Hg-1223	2.5	2.5 ^a
Hg-1234	2.3		-3.4	Hg-1234	2.3	
Hg-1245	2.3		-3.4	Hg-1245	2.3	

Данные таблицы №4 и результаты расчётов, выполненных с использованием уравнений (22) и (23), согласуются с определёнными Ф. Харди и др. значениями для оптимально легированного сверхпроводника Hg-1201: $dT_c/dP_a = +2.4$ К/ГПа, $dT_c/dP_c = -3.6$ К/ГПа, а также с экспериментально найденным значением $dT_c/dP = +1.2$ К/ГПа. Для сверхпроводника Hg-1223 получены значения $dT_c/dP_a = +2.5$ К/ГПа и $dT_c/dP_c = -3$ К/ГПа, что также находится в согласии с расчётами. Результаты, вычисленные для остальных Hg-содержащих сверхпроводников, также соответствуют приведённым в литературе значениям для

сверхпроводников Hg-12(n-1)n: $dT_c/dP_a \equiv 2.5 \pm 0.5$ ГПа и $dT_c/dP_c \equiv -3.5 \pm 1$ К/ГПа, рассчитанное влияние гидростатического давления на критическую температуру также согласуется с экспериментальными результатами (таблица №5).

В четвертой главе диссертации под названием «Свойства Y-основных купратов под гидростатическим и одноосным давлением» в рамках модели Казимира-Кемпфа исследованы физические свойства высокотемпературных сверхпроводников - $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y-123) и $YBa_2Cu_4O_8$ (Y-124) под гидростатическим и одноосным давлением. В данной главе теоретически проанализированы изменения критической температуры, плотности носителей заряда, эффективной массы и параметров кристаллической решетки этих сверхпроводников под воздействием давления. Также обосновано анизотропное влияние давления на параметры сверхпроводимости в купратах Y-123 и Y-124 по различным кристаллографическим направлениям.

При расчете одноосных производных критической температуры по давлению для оптимально легированного сверхпроводника Y-123 в рамках модели Казимира-Кемпфа, прежде всего, опираются на теоретические и экспериментальные данные о кристаллической структуре данного соединения, плотности носителей заряда, значениях эффективной массы, лондонской глубине проникновения и анизотропном изменении параметров решетки под воздействием давления.

1. Из первых экспериментов на оптимально легированном сверхпроводнике Y-123 известно, что концентрация носителей сверхпроводящего тока в плоскости CuO_2 составляет 0.19 дырок/ CuO_2 , или 0.205 Кл/м² (P.L. Alireza et al., Phys. Rev. B 95 (2017) 100505) и под давлением изменяется незначительно. В частности, Р. П. Гупта и М. Гупта для сверхпроводника Y-123 рассчитали изменения плотности носителей заряда под действием одноосного давления: $\partial n^*/\partial P_a = 0.0013$, $\partial n^*/\partial P_b = -0.0009$ и $\partial n^*/\partial P_c = 0.0021$, а для гидростатического давления - $\partial n^*/\partial P = 0.0025$ (дырка/ CuO_2)·ГПа⁻¹ (R.P. Gupta, M. Gupta, Phys. Rev. B 50 (1994) 9615–9618). Хотя эти результаты были получены для гидростатического давления $P=0.578$ ГПа, мы будем считать их справедливыми и для начального диапазона гидростатического/одноосного давления в несколько ГПа, приложенного к образцу.

2. В наших расчётах мы используем значение $\alpha = 1.5$ (S.E. Sebastian et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 107 (2010) 6175–6179). Кроме того, нам необходимы также значения $(\partial\alpha/\partial P_i)$. К сожалению, экспериментальные результаты и теоретические расчёты, описывающие, как изменяется эффективная масса носителей заряда в сверхпроводнике Y-123 под действием одноосного давления, отсутствуют. Однако, опираясь на результаты, полученные Р. П. Гуптой и М. Гуптой, для оптимально легированного сверхпроводника Y-123 можно сделать следующие выводы относительно эффективной массы носителей заряда и коэффициента: одноосное давление, направленное вдоль оси a кристаллической решётки, приводит к уменьшению критической температуры; с учётом соотношения $\partial n^*/\partial P_a > 0$ и уравнения (9) отсюда

следует, что $\partial\alpha/\partial P_a > 0$. Одноосное давление, направленное вдоль оси b , повышает критическую температуру, и поскольку $\partial n^*/\partial P_b < 0$, из уравнения (10) следует, что $\partial\alpha/\partial P_b < 0$. Аналогичным образом можно показать, что $\partial\alpha/\partial P_c > 0$. Кроме того, последние теоретические исследования показывают, что гидростатическое давление вызывает лишь небольшое изменение эффективной массы (S.W. Tozer et al., Phys. Rev. B 110 (2024) 144508). С учётом этого для сверхпроводника Y-123 мы принимаем значения $\partial\alpha/\partial P_a = 0,043$, $\partial\alpha/\partial P_b = -0,043$ и $\partial\alpha/\partial P_c = 0,02$ ГПа⁻¹.

Исходя из вышеприведённых данных, а также из того, что критическая температура оптимально легированного сверхпроводника Y-123 составляет 93 К, а коэффициент сжимаемости кристаллической решётки вдоль оси ссс равен $4.26 \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹, по уравнениям (9)–(11) были рассчитаны значения dT_c/dP_i . Эти значения вместе с другими параметрами, использованными при расчётах, приведены в таблице №6. Полученные нами для оптимально легированного сверхпроводника Y-123 значения $dT_c/dP_a = -2$ К/ГПа, $dT_c/dP_b = 2.2$ К/ГПа, $dT_c/dP_c = 0$ и $dT_c/dP = 0.2$ К/ГПа близки к экспериментальным результатам (рис. №2).

Таблица №6.

Физические параметры оптимально легированного сверхпроводника YBa₂Cu₃O_{7-δ} (Y-123)

T_c , К	K_c , 10^{-3} ГПа ⁻¹	n^* , C/m^2	α
93	4.26	0.205	1.5
$\partial n^*/\partial P_a$, $mC/ГПа \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P_b$, $mC/ГПа \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P_c$, $mC/ГПа \cdot m^2$	$\partial n^*/\partial P$, $mC/ГПа \cdot m^2$
1.4	-0.97	2.26	2.69
$\partial\alpha/\partial P_a$, ГПа ⁻¹	$\partial\alpha/\partial P_b$, ГПа ⁻¹	$\partial\alpha/\partial P_c$, ГПа ⁻¹	$\partial\alpha/\partial P$, ГПа ⁻¹
0.047	-0.05	0.016	0.013
dT_c/dP_a , К/ГПа	dT_c/dP_b , К/ГПа	dT_c/dP_c , К/ГПа	dT_c/dP , К/ГПа
-2	2.2	0	0.2

Чтобы переписать уравнение Кемпфа (уравнение (1)) через величины, непосредственно определяемые в экспериментах, воспользуемся следующим соотношением, связывающим плотность носителей заряда n^* и лондоновскую глубину проникновения магнитного поля $\lambda_{ab}(0)$:

$$\lambda_{ab}(0) = \frac{m_{ab}^{*1/2} c^{1/2}}{\mu_0^{1/2} n^{*1/2} q} \quad (24)$$

Из уравнений (1) и (24) нетрудно получить следующее выражение:

$$T_c = \frac{0.1\pi^{1/2}\hbar^{3/2}c_l^{1/2}}{2^{1/4}\eta k_B m_{ab}^{*1/2} \lambda_{ab}^{1/2}(0)c} \quad (25)$$

Здесь c_l обозначает скорость света в вакууме. Уравнение (25) выражает модель Казимира–Кемпфа через экспериментально определяемые величины $\lambda_{ab}(0)$, m_{ab}^* и параметр кристаллической решётки c .

Для определения влияния давления на критическую температуру сверхпроводимости возьмём производную уравнения (25) по гидростатическому давлению P :

$$\frac{dT_c}{dP} = \frac{\partial T_c}{\partial \lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + \frac{\partial T_c}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial P} \quad (26)$$

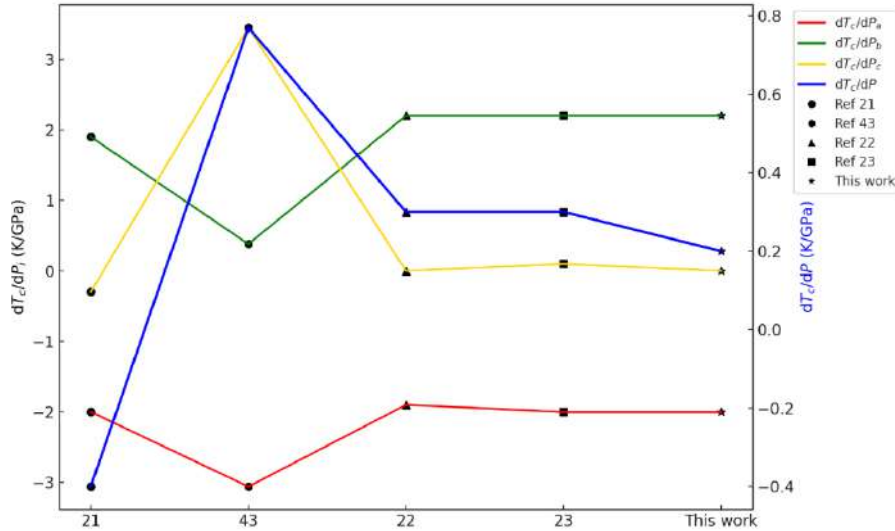


Рис. №2. Экспериментально определённые и рассчитанные в рамках модели Казимира–Кемпфа значения производных критической температуры по гидростатическому и одноосным давлениям для оптимально легированного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123).

Используя уравнение (25), выражение (26) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} - \frac{T_c}{c} \frac{\partial c}{\partial P} \quad (27)$$

Из уравнений (4) и (27) следует:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + K_c T_c \quad (28)$$

В экспериментальных исследованиях Р. Хасанова и других, посвящённых изменению критической температуры, лондоновской глубины проникновения и эффективной массы носителей заряда в сверхпроводнике Y-124 под действием внешнего гидростатического давления, показано, что при давлении до 1,02 ГПа критическая температура возрастает с 80,05 К до 85,22 К, лондоновская глубина проникновения уменьшается со 157 нм до 131 нм, а эффективная масса носителей заряда уменьшается на 32 % (R. Khasanov et al., J. Phys.: Condens. Matter. 17 (15) (2005) 2453). В этой связи, подставляя в уравнение (25) для атмосферного давления значения $T_c = 80.05$ К, $\lambda_{ab}(0) = 157$ нм и $c = 2.72$ нм, получаем $m_{ab}^* = 1.95m_e$. Данный результат близок как к экспериментально определённому значению $(2.7 \pm 0.3)m_e$ (A.F. Bangura et al., Phys. Rev. Lett. 100 (4) (2008) 047004), так и к теоретическому значению $1.5m_e$ (M.T.D. Orlando et al., Phys. Lett. A 382 (22) (2018) 1486–1491), рассчитанному на основе уравнения Кемпфа. Если принять, что в экспериментах Р. Хасанова и соавт. при $P = 0$ эффективная масса носителей заряда равна $1.95m_e$, то при $P = 1.02$ ГПа она уменьшается до $1.33m_e$. Таким образом, на основе указанных

экспериментальных данных получаем значения производных $d\lambda_{ab}(0)/dP = -25.5$ нм/ГПа и $dm_{ab}^*/dP = -0.61 m_e/\text{ГПа}$ (см. рис. 3). Подставляя эти результаты, а также значение коэффициента сжимаемости $K_c = 4.5 \times 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1}$, в уравнение (28), получаем $dT_c/dP = 19.4 \text{ К/ГПа}$, что примерно в 4 раза превышает экспериментально наблюдаемое значение 5 К/ГПа.

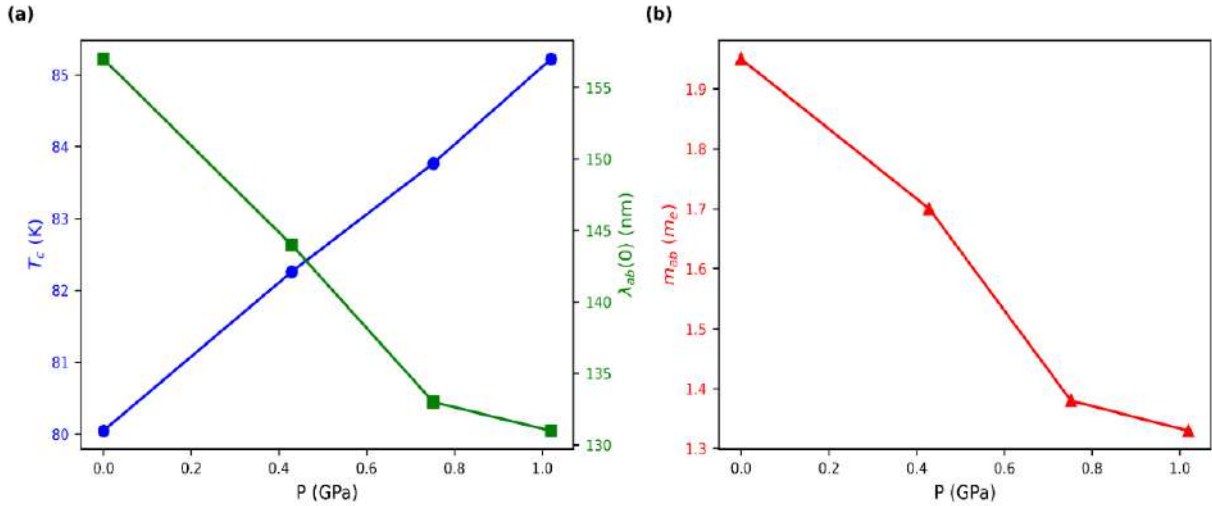


Рис. №3. Изменение (а) критической температуры и лондоновской глубины проникновения магнитного поля, а также (б) эффективной массы носителей заряда в сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ (Y-124) под действием гидростатического давления до 1.02 ГПа по данным экспериментов Хасанова и других.

Соответствие результатов, полученных различными исследовательскими группами с использованием разных экспериментальных методов, сред внешнего давления и критериев определения T_c , подтверждает надёжность данных о влиянии давления, измеренных для материала Y-124. Поэтому существенное завышение, даваемое уравнением (28), нельзя объяснить случайными экспериментальными ошибками или различиями между образцами. Напротив, это показывает, что модель, основанная только на идеальном эффекте Казимира, недостаточна для описания сверхпроводника Y-124, поскольку не учитывает другие важные микроскопические взаимодействия, влияющие на T_c под давлением. Чтобы учесть, помимо идеального казимировского взаимодействия, и другие эффекты, влияющие на сверхпроводимость под давлением, введём в уравнение (29) дополнительный линейный по давлению член τP :

$$T_c = \frac{0.1\pi^{1/2}\hbar^{3/2}c_l^{1/2}}{2^{1/4}\eta k_B m_{ab}^{*1/2} \lambda_{ab}^{1/2}(0)c} + \tau P \quad (29)$$

здесь τ выражает суммарное влияние на сверхпроводимость под давлением тех механизмов, которые не связаны с идеальным эффектом Казимира. К таким воздействиям можно отнести изменение колебаний решётки (фононов), усиление межслоевого переноса заряда под давлением или изменение электронного экранирования. Предположение о линейной зависимости является обоснованным в рассматриваемом диапазоне давлений как приближение первого порядка (first-order approximation).

Дифференцируя уравнение (29), получаем новое выражение для производной критической температуры сверхпроводимости по гидростатическому давлению:

$$\frac{dT_c}{dP} = -\frac{T_c}{2} \frac{1}{\lambda_{ab}(0)} \frac{\partial \lambda_{ab}(0)}{\partial P} - \frac{T_c}{2} \frac{1}{m_{ab}^*} \frac{\partial m_{ab}^*}{\partial P} + K_c T_c + \tau \quad (30)$$

Уравнение (30) теперь четко отделяет вклад идеального эффекта Казимира (первые три члена) от феноменологической поправки τ . Этот подход позволяет оценить вклад сил вакуумных флуктуаций в чувствительность к давлению отдельно от влияний, связанных со структурой решетки и зарядных цепей, и, как следствие, облегчает определение относительной значимости механизмов, формирующих dT_c/dP . В результате корректировки уравнения (30) к экспериментально измеренным значениям dT_c/dP $\tau = -14.4$ К/Гра. Это значение позволяет количественно описать изменение критической температуры под действием давления в рамках модели Казимира-Кемпфа (табл.№7)

Таблица№7

Экспериментальные и теоретически определённые значения производной критической температуры по давлению dT_c/dP для сверхпроводника Y-124.

dT_c/dP (К/ГПа)	Метод	Источник
5.5	Эксперимент при гидростатическом давлении	Bucher <i>et al.</i>
5.5	Эксперимент при гидростатическом давлении	Y. Yamada <i>et al.</i>
5.0	Эксперимент при гидростатическом давлении	E.N. Van Eenige <i>et al.</i>
5.5	Эксперимент при одноосном растяжении	M.Mito <i>et al.</i>
5.5	Эксперимент при гидростатическом давлении	J.J. Scholtz <i>et al.</i>
5.5	Эксперимент при гидростатическом давлении	H. Takahashi <i>et al.</i>
5.0	Эксперимент при гидростатическом давлении	R. Khasanov <i>et al.</i>
19.4	Модель Казимира–Кемпфа (на основе уравнения (28))	A. Ahadov & D. Dzhuraev
5.0	Модель Казимира–Кемпфа (на основе уравнения (30))	A. Ahadov & D. Dzhuraev

Отрицательное значение τ показывает, что в рамках подхода Казимира–Кемпфа межслоевые взаимодействия, не связанные с идеальным эффектом Казимира, при давлении ослабляют T_c , то есть частично компенсируют положительный вклад идеального эффекта Казимира в повышение критической температуры. В сверхпроводнике Y-124 наличие двух Cu–O-цепочек и их сильная связь со слоями CuO_2 также могут играть важную роль в сверхпроводимости под давлением. Давление может изменять распределение заряда между цепочками и плоскостями, фононные колебания,

связанные с атомами кислорода в цепочках, а также межслоевое электронное экранирование. Эти и другие факторы препятствуют полному проявлению идеального эффекта Казимира. В целом из вышеизложенного следует, что высокотемпературная сверхпроводимость возникает в результате сложного взаимодействия факторов, связанных с кристаллической и электронной структурой, и квантовых флуктуаций, а для обеспечения быстрого роста критической температуры под давлением необходимо создавать благоприятные условия для возникновения идеального эффекта Казимира между слоями CuO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований на тему «Изменение параметров купратных высокотемпературных сверхпроводников под воздействием давления с использованием модели Казимира-Кемпфа» были получены следующие результаты и представлены следующие выводы:

1. Впервые на основе энергии Казимира и модели минимальной длины Кемпфа получены новые уравнения, описывающие одноосные производные критической температуры по давлению в высокотемпературных купратах. Посредством них разработана теоретическая модель, описывающая анизотропное влияние одноосного давления на критическую температуру;

2. На основе подхода Казимира-Кемпфа получены уравнения, описывающие влияние одноосного давления на эффективную массу носителей заряда для купратных сверхпроводников и теоретически обосновано, что давление, приложенное по разным направлениям кристаллической решетки, оказывает анизотропное влияние на эффективную массу.

3. Впервые рассчитаны значения эффективной массы носителей заряда в сверхпроводниках Hg-12 (n-1)n по одноосному давлению. Уменьшение (увеличение) эффективной массы под действием давления, направленного вдоль оси a (c) кристаллической решетки, анизотропное изменение критической температуры, наблюдаемое в экспериментах под одноосным давлением, показано на основе модели Казимира-Кемпфа.;

4. Рассчитаны значения критических температур сверхпроводников Hg-12 (n-1) и Y-123 по одноосным и гидростатическим давлениям. Установлено, что результаты, рассчитанные с помощью модели Казимира-Кемпфа по изменению критической температуры, плотности носителей заряда, их эффективной массы и параметров кристаллической решетки этих образцов под одноосным давлением, соответствуют экспериментальным результатам;

5. Зависимости между глубиной лондонского проникновения магнитного поля, плотностью носителей заряда и их эффективной массой в ab -плоскости переписаны с помощью уравнения Кемпфа и теоретически обосновано, что уменьшение глубины лондонского проникновения и эффективной массы под действием давления приводит к увеличению критической температуры;

6. Количественные зависимости между изменениями параметров сверхпроводимости образца Y-124 под давлением рассчитаны с использованием модели Казимира-Кемпфа и установлено, что значение производной критической температуры по гидростатическому давлению в 4 раза больше, чем неидеальный эффект Казимира под влиянием идеального эффекта Казимира между слоями оксида меди.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE BUKHARA STATE UNIVERSITY**

BUKHARA STATE UNIVERSITY

AHADOV ABDULLO AMRULLOJON OGLI

**PRESSURE-INDUCED VARIATION OF THE PARAMETERS OF HIGH-
TEMPERATURE CUPRATE SUPERCONDUCTORS WITHIN THE
CASIMIR–KEMPF MODEL**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

Bukhara – 2026

The theme of the doctor of philosophy (PhD) dissertation in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the No. B2025.4.PhD/FM1419.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Bukhara State University.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.buxdu.uz and on the website of "Ziyonet" Information and Educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:

Dzhuraev Davron Rahmonovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents:

Yavidov Bakhram Yangibaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent

Sharopov Utkirjon Bahodirovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior researcher

Leading organization:

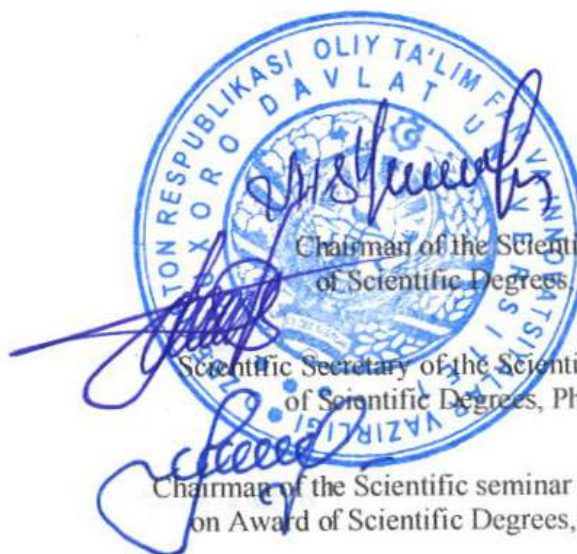
**Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences
of the Republic of Uzbekistan**

The defense of the dissertation will be held on "7" July 2026, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Bukhara State University (Address: 200117, BSU, M. Iqbol street 11, Bukhara city, tel. (+99865) 221-30-46; fax (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the BSU (registered under No. 934) Address: 200117, BSU, M. Iqbol street 11, Bukhara city, tel. (+99865) 221-30-46.

The abstract of dissertation was distributed on "25" June 2026.

(Registry record No. 1 dated "25" June 2026.)



M.Z. Sharipov

Chairman of the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

A.A. Turayev

Scientific Secretary of the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, PhD Ph-M.S., Professor

Sh.A. Rakhimov

Chairman of the Scientific seminar the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation)

The aim of the research. The aim is to theoretically analyze, based on the Casimir–Kempf model, the relationships among the principal superconducting parameters in high-temperature cuprate superconductors that vary under pressure, namely the critical temperature, charge-carrier density, effective mass, and the London magnetic penetration depth.

The tasks of the research:

deriving equations for the uniaxial pressure derivatives of the critical in high-temperature cuprate superconductors based on Casimir energy and Kempf's minimal length model, and developing a theoretical model that describes the anisotropic effect of uniaxial pressure;

deriving equations for the uniaxial pressure derivatives of the effective mass of charge carriers in high-temperature superconducting cuprates based on the Casimir-Kempf model, and theoretically substantiating the anisotropic effect of pressure applied along different directions of the crystal lattice on the effective mass;

calculating the uniaxial pressure derivative values of the charge carrier effective mass in Hg-12(n-1)n cuprates, and explaining the relationship between the change in effective mass under pressure directed along the $a(c)$ -axis of the crystal lattice and the anisotropic change in critical temperature under uniaxial pressure based on the Casimir-Kempf model;

calculating the changes in the critical temperature of Hg-12(n-1)n and Y-123 cuprates under uniaxial and hydrostatic pressure based on the Casimir-Kempf model, and determining the quantitative correlation between superconducting parameters under pressure;

determining the dependencies of the London penetration depth of the magnetic field, charge carrier density, and effective mass variations under hydrostatic pressure based on the Casimir-Kempf approach, and theoretically substantiating the effects of the London penetration depth and effective mass on the critical temperature;

calculating the variations in parameters such as critical temperature, charge carrier density, effective mass, and London penetration depth in the Y-124 superconductor under external pressure based on the Casimir-Kempf model, and comparing the effects of ideal and non-ideal Casimir effects on the critical temperature.

The objects of the research. CuO₂ layers, Hg-12(n-1)n, Y-123, Y-124, and superconductors under hydrostatic and uniaxial pressure.

The subject of the research. Dependence of the superconducting critical temperature, charge carrier density, effective mass, and London magnetic penetration depth on external hydrostatic and uniaxial pressure in high-temperature cuprate superconductors based on the Casimir–Kempf model.

The scientific novelty of the research:

for the first time, taking into account the Casimir effect, equations for calculating the uniaxial pressure derivatives of the critical temperature for high-temperature superconducting cuprates were obtained, and through them, a

theoretical model describing the anisotropic effect of uniaxial pressure on the critical temperature was developed;

for the first time, based on the Casimir-Kempf model, theoretical equations representing the effect of uniaxial pressure on the effective mass of charge carriers in cuprate high-temperature superconductors were derived, and through these equations, it was theoretically substantiated that pressure applied along different directions of the crystal lattice exerts an anisotropic effect on the effective mass;

for the first time, the uniaxial pressure derivative values of the charge carrier effective mass in Hg-12(n-1)n superconductors were calculated, and it was explained based on the Casimir-Kempf model that the effective mass decreases (increases) under the influence of pressure directed along the $a(c)$ -axis of the crystal lattice, accounting for the experimentally observed anisotropic variation of the critical temperature under uniaxial pressure;

the derivative values of the critical temperature with respect to uniaxial and hydrostatic pressure for Hg-12(n-1)n and Y-123 superconductors were calculated, and the relationship between the changes in charge carrier density, their effective mass, crystal lattice parameters, and critical temperature under pressure was determined;

the correlation between the superconducting critical temperature, charge carrier effective mass, and the London penetration depth of the magnetic field under hydrostatic pressure was determined based on the Casimir-Kempf approach, and it was theoretically substantiated that the pressure-induced decrease in the London penetration depth and effective mass leads to an increase in the critical temperature;

the relationships between the changes in critical temperature, London penetration depth, and charge carrier effective mass in the Y-124 superconductor under hydrostatic pressure were calculated based on the Casimir-Kempf model. In particular, it was determined that the derivative value of the critical temperature with respect to hydrostatic pressure under the influence of the ideal Casimir effect between copper oxide layers is 4 times greater than that under the non-ideal Casimir effect.

Implementation of the research results. Based on the results obtained in studying the relationships among the superconducting parameters of cuprates under pressure within the framework of the Casimir-Kempf model:

the results of calculating the uniaxial pressure derivatives of the critical temperature for the Y-123 superconductor were applied in comparing the dependence of the charge carrier effective mass on hole concentration with calculations based on the bipolaron model (Physica B: Condensed Matter 727, 418383, 2026), as well as in explaining the relationships between the crystal structure, electronic structure, and energy-dependent parameters in rare-earth-doped magnesium and barium aluminate samples synthesized by the sol-gel method (The European Physical Journal B 99, 11, 2026);

the scientific innovations, such as the equations developed to determine the uniaxial pressure derivatives of the charge carrier effective mass based on the Casimir-Kempf model of superconductivity and the calculated values of these

derivatives for Hg-12(n-1)n superconductors, were utilized within the framework of the research program scheduled for 2022–2023 at Andijan State Technical University to compare the scientific results of the fundamental research project titled "Katta ma'lumotlarga asoslangan intellektual (AI) qayta tiklanadigan energiya tarmoq tizimini tadqiq etish va qo'llash" (Reference No. 01-03-475 issued by Andijan State Technical University on February 4, 2026). The utilization of these scientific results enabled research into automated sensing technologies, as well as the study of coordination control technology based on the integration of big data and automated sensors for integrated energy supply systems;

the calculated results regarding the effect of pressure on the superconducting parameters of Y-based cuprates were utilized by the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences in conducting the scientific project scheduled for 2025–2026, titled "Научно-технические принципы создания экологичных сверхскоростных магнитолевитационных транспортных магистралей на основе высокотемпературных сверхпроводников" (Reference No. 11220-8447-651 issued by the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences on March 4, 2026). The utilization of these scientific results enabled a quantitative analysis of changes in the superconducting parameters of cuprates under external pressure and allowed for the comparison of calculation results with experimental data.

Publication of the research results: A total of 13 scientific works has been published on the dissertation topic. Of these, 8 articles have been published in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science, and Innovation of the Republic of Uzbekistan for the publication of doctoral dissertation results, with 6 in Scopus-indexed journals.

Structure and volume of the dissertation: The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of published works, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 125 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

1-bo'lim (1 часть; Part 1)

1. Ahadov A, Dzhuraev D. Anisotropic pressure dependence of the in-plane effective mass in optimally doped Hg-based cuprates: a Casimir energy approach // *Physica B: Condensed Matter*. – Elsevier B.V. (Netherlands), 2025. – Vol. 718. – pp. 417864. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 2.8, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.417864>.

2. Ahadov A, Dzhuraev D. Testing the Casimir energy-induced superconductivity model in $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$: Correlations among the in-plane magnetic penetration depth, the effective mass of charge carriers, and the critical temperature variations under pressure // *Physics Letters A*. – Elsevier B.V. (Netherlands), 2025. – Vol. 563. – pp. 131034. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 2.6, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.131034>.

3. Ahadov A, Dzhuraev D. Understanding and calculating the effects of uniaxial and hydrostatic pressure on the critical temperature of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123) superconductor within the framework of the Casimir energy scenario and the Kempf equation // *Solid State Communications*. – Elsevier Ltd (UK), 2025. – Vol. 404. – pp. 116047. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 2.4, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2025.116047>.

4. Ahadov A, Dzhuraev D. A model for calculating the uniaxial pressure derivatives of the critical temperature in Hg-12(n-1)n superconductors: A Casimir energy scenario // *Solid State Communications*. – Elsevier Ltd (UK), 2025. – Vol. 407. – pp. 116221. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 2.4, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2025.116221>.

5. Ahadov A., Dzhuraev D. Uniaxial pressure derivatives of the critical temperature in Casimir energy-induced superconductivity // *The European Physical Journal B*. - Springer New York (USA), 2025. – Vol. 98, No. 12. – pp. 108-113. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 1.7, Q3). <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-025-00958-7>.

6. A.A. Ahadov. Classification of modern superconductors and their theory based on through experiments conducted on cuprates // *E3S Web of Conference* – EDP Sciences (France), 2023. – Vol. 460. – pp. 07030. (01.00.00; № 3 Scopus; IF = 0.6, Q4). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007030>.

7. D.R. Djurayev, A.A. Ahadov. Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik hodisasini ifodalovchi ba'zi mexanizmlar // *BuxDU ilmiy axboroti*. – Buxoro (O'zbekiston), – 2024. – №5. – pp. 93-98. (01.00.00; № 3).

8. D.R. Dzhuraev, A.A. Ahadov. Influence of uniaxial and hydrostatic pressure on the effective mass in Hg-1223 superconductor: a simplified Casimir energy approach // *BuxDU ilmiy axboroti*. – Buxoro (O'zbekiston), – 2025. – №11. – pp. 125-128. (01.00.00; № 3).

2-bo'lim (2 часть; Part 2)

9. Djurayev D., Ahadov A. Optimal legirlangan Hg-1201 o'ta o'tkazgich zaryad tashuvchilar effektiv massasining bir o'qli bosim ostida o'zgarishi // "Jahon sivilizatsiyasida Buxoroning o'ni: boy meros, barqaror rivojlanish, yorqin kelajak" mavzusida Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya, Buxoro 2025-yil, 9-sentabr.– pp. 133-135.

10. Djurayev D., Ahadov A. Kazimir energiyasi yondashuvi asosida turli kislorod kontentli $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ (Hg-1201) o'ta o'tkazgich kritik haroratini hisoblash modeli // "Jahon sivilizatsiyasida Buxoroning o'ni: boy meros, barqaror rivojlanish, yorqin kelajak" mavzusida Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya, Buxoro 2025-yil, 9-sentabr. – pp. 445-447.

11. Dzhuraev D.R., Ahadov A.A., Problems on representing mechanism of the phenomenon of high temperature superconductivity // Сборник тезисов первой международной научно-технической конференции "Современные проблемы физики, энергетики и теплотехники", 5 декабря, Самарканд-2024. – с. 218-219.

12. D.R. Dzhuraev, A.A. Ahadov. Influence of Uniaxial Pressure on the Effective Mass of Charge Carriers in Y-123 Superconductors // Международная научная конференция "ОМССР–III 2025: Оптика, материаловедение и вычисления в физике конденсированного состояния", 16-18 декабря 2025 г., Узбекистан, Бухара. – с. 99-100.

13. D.R. Dzhuraev, A.A. Ahadov. Application of the Casimir–Kempf Model to the Study of Pressure-Dependent Properties of the Y-124 Superconductor // Международная научная конференция "ОМССР–III 2025: Оптика, материаловедение и вычисления в физике конденсированного состояния", 16-18 декабря 2025 г., Узбекистан, Бухара. – с.100-102.

Avtoreferat “Durdona” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarning mosligi tekshirildi.



Bosishga ruxsat etildi: 22.06.2026-yil. Bichimi 60x84 1/16, «Times New Roman» garniturada raqamli bosma usulida bosildi. Shartli bosma tabog‘i 3,0.

Adadi: 100 nusxa. Buyurtma №458

