ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

RUX ISHLAB CHIQARISH KEKLARINI QAYTA ISHLASHNING ENERGIYA VA RESURS-TEJAMKOR TEXNOLOGIYASINI TADQIQ ETISH

Hojiyev Shohruh Toshpo‘latovich
Olmaliq davlat texnika instituti, PhD, dotsent, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: shohruhhojiyev@gmail.com
Xaydaraliyev Xolbay Rustam o‘g‘li
Olmaliq davlat texnika instituti, katta o‘qituvchi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: xolboyxaydaraliyev@gmail.com
O‘razaliyev Shunqor Bahodir o‘g‘li
Olmaliq davlat texnika instituti, magistrant, Olmaliq, O‘zbekiston
Xabibullayeva Muxlisa Xayrulla qizi
Olmaliq davlat texnika instituti, talaba, Olmaliq, O‘zbekiston

Annotatsiya. Mazkur ilmiy maqolada rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalarini vodorodotermik usulda qayta ishlash jarayonining termodinamik va kinetik jihatlari o‘rganilgan. Tadqiqot ferrit–vodorod sistemasida kechadigan asosiy kimyoviy reaksiyalar tizimini tahlil qilishga, rux ferritining kristall panjarasini buzish va rux hamda temirni ikki valentli holatgacha qaytarish uchun zarur bo‘lgan optimal harorat sharoitlarini aniqlashga qaratilgan. Termodinamik hisob-kitoblar natijasida rux ferritining vodorod bilan tiklanish jarayoni 848 K dan boshlab mumkinligi, jarayonning amaliy jihatdan samarali borishi uchun optimal harorat oralig‘i esa 898–998 K ekani asoslab berildi. Metallarni metallik holatgacha qaytarmasdan faqat ikki valentli holatgacha tiklash vodorod sarfini kamaytirishi va jarayonning energetik samaradorligini oshirishi ko‘rsatildi. Olingan natijalar keyingi sulfat kislotada tanlab eritish jarayonida rux va temirning eritmaga to‘liqroq o‘tishini ta’minlab, qattiq qoldiqda oltin va kumush kabi nodir metallarning konsentratsiyasini oshirish imkonini yaratadi.

Kalit so‘zlar: rux ferriti, vodorodotermik tiklash, termodinamik tahlil, Gibbs energiyasi, tanlab eritish, rux keklari, resurs-tejamkor texnologiya.

Аннотация. В данной научной статье исследованы термодинамические и кинетические аспекты водородотермической переработки ферритных структур, нерастворимых в серной кислоте, содержащихся в цинковых кеках. Работа направлена на анализ системы химических реакций в системе «феррит–водород» с целью разрушения кристаллической структуры цинкового феррита и перевода цинка и железа в двухвалентное состояние. По результатам термодинамических расчётов установлено, что восстановление цинкового феррита водородом становится термодинамически возможным

ISSN 3030-3907

при температуре 848 K, а оптимальный температурный интервал процесса составляет 898–998 K. Показано, что ограничение восстановления металлов двухвалентным состоянием позволяет снизить расход водорода и повысить энергетическую эффективность процесса. Полученные результаты обеспечивают благоприятные условия для последующего селективного выщелачивания в сернокислой среде и способствуют повышению концентрации благородных металлов (Au, Ag) в твёрдом остатке.

Ключевые слова: цинковый феррит, водородотермическое восстановление, термодинамический анализ, энергия Гиббса, селективное выщелачивание, цинковые кеки, ресурсосберегающая технология.

Abstract. This paper investigates the thermodynamic and kinetic aspects of hydrogen-based thermal treatment of sulfate-insoluble ferrite structures contained in zinc production residues. The study focuses on the analysis of chemical reaction pathways in the ferrite–hydrogen system aimed at breaking the crystal structure of zinc ferrite and converting zinc and iron into divalent forms. Thermodynamic calculations indicate that hydrogen reduction of zinc ferrite becomes feasible at temperatures above 848 K, while the optimal operating temperature range is determined to be 898–998 K. It is demonstrated that limiting the reduction to the divalent state, rather than full metallization, significantly reduces hydrogen consumption and improves the overall energy efficiency of the process. The proposed approach enhances the subsequent sulfuric acid selective leaching of zinc and iron and promotes the enrichment of valuable metals such as gold and silver in the solid residue.

Keywords: zinc ferrite, hydrogen thermal reduction, thermodynamic analysis, Gibbs free energy, selective leaching, zinc residues, resource-efficient technology.

Kirish.

Rux ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan texnogen keklar rangli metallurgiya sanoatining muhim ikkilamchi xomashyosi hisoblanadi. Ushbu keklar tarkibida ruxning sezilarli qismi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalar, xususan $ZnFe_2O_4$ ko‘rinishida bog‘langan bo‘lib, bu holat ruxni gidrometallurgik usullar bilan samarali ajratib olishni sezilarli darajada cheklaydi [1]. Ferrit fazalarining yuqori termodinamik barqarorligi va zich kristall panjarasi ruxning eritmaga o‘tish darajasini pasaytiradi, natijada metallni yo‘qotishlar ortadi va ishlab chiqarish samaradorligi kamayadi [2]. Shu sababli ferrit strukturalarini buzish va ruxni eriydigan shaklga o‘tkazish masalasi ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb hisoblanadi.

Zamonaviy ilmiy tadqiqotlarda ferrit fazalarini parchalash uchun pirometallurgik, gidrometallurgik hamda kombinatsiyalashgan usullar taklif

ISSN 3030-3907

etilgan. Jumladan, yuqori haroratli kuydirish, sulfidlovchi yoki ishqoriy ishlov berish usullari ma’lum bo‘lsa-da, bu texnologiyalar yuqori energiya sarfi, ikkilamchi chiqindilar hosil bo‘lishi va ekologik yuklamaning ortishi bilan tavsiflanadi [3]. So‘nggi yillarda ferrit strukturalarini tiklovchi atmosfera sharoitida qayta ishlash orqali ularning kristall panjarasini buzish va rux oksidini ajratib olishga tayyorlash g‘oyasi ilmiy adabiyotlarda muhokama qilinmoqda [4]. Xususan, vodorod gazidan foydalanilgan vodorodotermik ishlov berish ferrit fazalarini selektiv ravishda qaytarish imkonini beruvchi istiqbolli yo‘nalish sifatida qaralmoqda [5].

Amaldagi rux ishlab chiqarish texnologiyalarida keklar tarkibidagi ferrit strukturalarining saqlanib qolishi ruxni sulfat kislota eritmalarida to‘liq eritib olishga to‘sqinlik qilmoqda [6]. Ferrit tarkibidagi ruxning bevosita gidrometallurgik jarayonda odatdagi sharoitda yaxshi erimasligi texnologik jarayonni murakkablashtiradi hamda umumiy metall ajratib olish ko‘rsatkichlarini pasaytiradi [7]. Shu bois ferrit strukturalarini dastlabki bosqichda buzish va ruxni eriydigan ZnO shakliga o‘tkazishga xizmat qiluvchi samarali tayyorlov jarayonini ishlab chiqish zarurati mavjud [8].

Mavjud ilmiy tadqiqotlarda vodorod ishtirokida ferrit fazalarining qaytarilishi masalasi asosan umumiy termodinamik nuqtai nazardan yoritilgan bo‘lib, rux ferritlari uchun reaksiyalar tizimining chuqur termodinamik va kinetik tahliliga yetarli e’tibor qaratilmagan [9]. Xususan, ferrit–vodorod sistemasida kechadigan asosiy va parallel reaksiyalarning Gibbs erkin energiyasi, haroratga bog‘liqligi, muvozanat sharoitlari hamda jarayonning kinetik cheklovlari kompleks tarzda o‘rganilmagan. Bu holat keyingi samarali tanlab eritish uchun vodorodotermik tayyorlov jarayonini sanoat sharoitida asoslab joriy etishni murakkablashtirmoqda [10].

Adabiyot manbalarida keltirilgan ma’lumotlarga ko‘ra, vodorod yuqori qaytaruvchanlik xususiyatiga ega bo‘lib, temir va rux oksidlarining qaytarilish reaksiyalarida termodinamik jihatdan qulay sharoitlarni ta’minlaydi [11]. Bundan tashqari, vodorod molekulasi o‘lchamining juda kichikligi uni qattiq fazalarning ichki g‘ovaklariga qadar kirib borishini, bu esa tiklanish reaksiyasining samaradorligini oshishiga olib keladi. Shu bilan birga, ferrit fazalarining qaytarilishi ko‘p bosqichli jarayon bo‘lib, unda kristall panjaraning buzilishi va yangi fazalarning hosil bo‘lishi kinetik omillar bilan cheklanadi. Ushbu jarayonlarni nazariy asoslash uchun termodinamik va kinetik tahlil muhim ilmiy vosita hisoblanadi.

O‘zbekiston sharoitida rux ishlab chiqarish hajmining ortishi bilan birga, texnogen keklar miqdori ham yil sayin ko‘payib bormoqda. Mazkur chiqindilarni

ISSN 3030-3907

kompleks va resurs-tejamkor qayta ishlash mamlakat metallurgiya sanoati uchun muhim vazifalardan biridir. Ferrit strukturalarini vodorodotermik usulda qayta ishlash orqali ruxni samarali ajratib olish texnologiyasini ishlab chiqish mahalliy xomashyodan oqilona foydalanish hamda ekologik yuklamani kamaytirish imkonini beradi.

Ushbu tadqiqotning asosiy vazifasi rux ferritlarining vodorod ishtirokida qaytarilish jarayonida kechadigan kimyoviy reaksiyalar tizimini aniqlash hamda ularning termodinamik va kinetik qonuniyatlarini o‘rganishdan iborat. Shuningdek, haroratning jarayonga ta’siri va ferrit strukturalarining buzilish sharoitlarini ilmiy jihatdan asoslash ko‘zda tutiladi.

Mazkur tadqiqotning maqsadi rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi ferrit strukturalarini vodorodotermik usulda qayta ishlash jarayonini termodinamik va kinetik jihatdan asoslash, ferrit–vodorod sistemasida sodir bo‘ladigan asosiy kimyoviy reaksiyalarni tahlil qilish hamda ruxni sulfat kislota eritmalarida samarali eriydigan shaklga o‘tkazish imkoniyatlarini ilmiy jihatdan baholashdan iborat.

TADQIQOT OBYEKTLARI VA METODIKASI. Mazkur tadqiqotning obyektlari sifatida rux ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan keklar tarkibidagi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalar, asosan rux ferriti ($ZnFe_2O_4$), shuningdek, vodorod gazi ishtirokida ferrit–oksid sistemasida kechadigan tiklanish reaksiyalari tanlab olindi. Tadqiqotda rux ferritining vodorodotermik sharoitda parchalanishi, rux oksidining ferrit kristall panjarasidan ajralib chiqishi hamda temir oksidlarining fazaviy o‘zgarishlari bilan bog‘liq kimyoviy reaksiyalar tizimi asosiy tadqiqot obyekti sifatida qaraldi. Ushbu jarayonlar keyingi bosqichda ruxni sulfat kislota eritmalarida samarali eritishga tayyorlash nuqtai nazaridan baholandi.

Tadqiqot metodikasi ferrit–vodorod sistemasida sodir bo‘ladigan asosiy va oraliq kimyoviy reaksiyalarni termodinamik va kinetik jihatdan tahlil qilishga asoslandi. Reaksiyalarda ishtirok etuvchi moddalarning standart entalpiya, Gibbs erkin energiyasi va entropiya qiymatlari maxsus termodinamik ma’lumotnomalardan olinib, Gess qonuni asosida reaksiyalarning standart sharoitdagi termodinamik kattaliklari hisoblandi. Olingan ma’lumotlar asosida Gibbs energiyasining haroratga bog‘liqlik tenglamalari tuzildi, turli harorat oralig‘ida reaksiyalarning erkin energiya qiymatlari va muvozanat konstantalari aniqlandi hamda Ellingem diagrammalari qurildi. Ushbu metodik yondashuv rux ferritining vodorod bilan tiklanish jarayonining termodinamik imkoniyatlarini baholash, limitlovchi bosqichlarni aniqlash va jarayonning optimal harorat sharoitlarini ilmiy asoslash imkonini berdi.

ISSN 3030-3907

NATIJALAR VA MUHOKAMA. Kuchsiz tiklovchi muhitga ega bo‘lgan gazlar aralashmasidagi tiklovchi moddalar ichidan aynan vodorodning hajmiy ulushi ko‘p bo‘lganligi tufayli rux kuyindisi tarkibidagi komponentlar bilan vodorod gazining to‘qnashishlari soni ham ko‘p bo‘ladi va shuning uchun 1-sinfga oksidlarning vodorod bilan tiklanish reaksiyalari kiritildi. Rux ishlab chiqarish kuyindilari tarkibidagi oksidlarning yuqori haroratda vodorod bilan ta’sirlashish jarayonlarining kimyoviy reaksiyalari quyidagilardan iborat:

$$3ZnFe_2O_4 + H_2 = 3ZnO + 2Fe_3O_4 + H_2O \quad (1)$$

$$Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O \quad (2)$$

$$FeO + H_2 = Fe + H_2O \quad (3)$$

$$ZnO + H_2 = Zn + H_2O \quad (4)$$

Qolgan kimyoviy reaksiyalar oraliq reaksiyalar bo‘lib, ular mahsulot hosil bo‘lishiga qarab tegishli kimyoviy reaksiya mexanizmining oraliq bosqichlarida sodir bo‘ladi. Masalan, (1) kimyoviy reaksiyada mahsulot sifatida rux oksidi (ZnO) va magnetit (Fe_3O_4) hosil bo‘lishi jarayonining borish mexanizmida dastlabki bosqichda rux ferritidan iborat shpinel tarkibidagi Fe_2O_3 (uch valentli temir oksidi yoki gematit) qismida kislorodning miqdori ko‘pligi sababli oksidlovchilik potensiali aynan shu mintaqada yuqori bo‘ladi va vodorodni o‘ziga jalb qiladi. Natijada uch valentli temir oksidi vodoroddan bitta elektron qabul qilib ikki valentli temir oksidiga (FeO) qadar tiklanadi:

$$ZnFe_2O_4 + H_2 = ZnO + 2FeO + H_2O \quad (5)$$

Jarayon mexanizmining ikkinchi bosqichida esa birinchi bosqichdan hosil bo‘lgan FeO molekulalari qo‘shni rux ferriti molekulalaridan rux oksidini siqib chiqaradi va o‘zi Fe_2O_3 bilan bog‘lanib temirning qo‘sh oksidini (magnetitni) hosil qiladi:

$$ZnFe_2O_4 + FeO = ZnO + Fe_3O_4 \quad (6)$$

Rux ishlab chiqarish kuyindilarining vodorod bilan tiklanish jarayonlarini termodinamik tahlil qilish uchun maxsus ma’lumotnomalardan reaksiyada ishtirok etuvchi moddalarning standart termodinamik qiymatlari topildi va ular 1-jadvalda taqdim etilgan.

1-jadval.

Moddalarning tegishli termodinamik kattaliklari (298 K)

№	Modda	ΔH^o, kJ/mol	ΔG^o, kJ/mol	ΔS^o, J/(mol*K)
1	$ZnFe_2O_4$	-1182	-1077	153,3
2	ZnO	-350,62	-320,66	43,64
3	FeO	-272	-251,46	60,75
4	Fe_3O_4	-822,2	-740,32	87,4
5	$H_2O_{bug‘}$	-228,597	-242,827	188,724

ISSN 3030-3907

6	H_2	0	0	130,52
7	Fe	0	0	27,15
8	Zn	0	0	41,63

2-jadval.

Vodorodotermik tiklanish reaksiyalarining standart sharoitdagi (298 K) qiymatlari

№	Kimyoviy reaksiyalar	ΔH_{reak}, kJ	ΔG_{reak}, kJ	ΔS_{reak}, J/K
1	$ZnFe_2O_4 + H_2 = ZnO + 2FeO + H_2O$	58,783	10,593	70,044
2	$Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O$	-222,397	-256,887	153,054
3	$FeO + H_2 = Fe + H_2O$	43,403	8,633	24,604
4	$ZnO + H_2 = Zn + H_2O$	122,023	77,833	56,194

1-jadvalda berilgan qiymatlardan foydalanib, Gess qonuni bo‘yicha vodorod bilan boradigan tiklanish kimyoviy reaksiyalarining standart sharoitdagi natijalari hisoblandi va ular 2-jadvalda taqdim etilgan.

2-jadvalda taqdim etilgan standart sharoit uchun qilingan termodinamik hisoblashlar natijasida 2-reaksiya ekzotermik va standart sharoitda mustaqil ravishda bora oladi (faqatgina aktivlanish enrgiyasi berilishi shart). Lekin 1, 3, 4-reaksiyalar endotermik va standart sharoitda ularning erkin energiyasi musbat qiymatlarni namoyon qildi. Bu esa mazkur reaksiyalarni standart sharoitda o‘z-o‘zidan sodir bo‘lmasligini bildiradi. Bu reaksiyalarning borishi uchun yuqori haroratlar talab etiladi.

2-jadvalda berilgan standart sharoitdagi termodinamik qiymatlardan foydalanib, barcha vodorodotermik kimyoviy reaksiyalar uchun Gibbs energiyasi o‘zgarishini haroratga bog‘liqligining umumiy formulalari quyidagicha yoziladi:

1. $ZnFe_2O_4 + H_2 = ZnO + 2FeO + H_2O$ $\Delta G_1^T = 58,783 - 0,070044T$
2. $Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O$ $\Delta G_2^T = -222,397 - 0,153054T$
3. $FeO + H_2 = Fe + H_2O$ $\Delta G_3^T = 43,403 - 0,024604T$
4. $ZnO + H_2 = Zn + H_2O$ $\Delta G_4^T = 122,023 - 0,056194T$

Yuqorida keltirilgan to‘rtta vodorodotermik kimyoviy reaksiyalarning erkin energiyasini haroratga bog‘liqlik tenglamalariga asoslanib, bir nechta haroratlarda kuyindi tarkibidagi oksidlarni tiklanish reaksiyalarining erkin energiyasi qiymatlari hisoblab topildi va bu qiymatlar 3-jadvalda taqdim etilgan. Bunda sistemada harorat har 50 birlikka o‘zgarganda Gibbs energiyasining qiymatlari hisoblandi.

3-jadval.

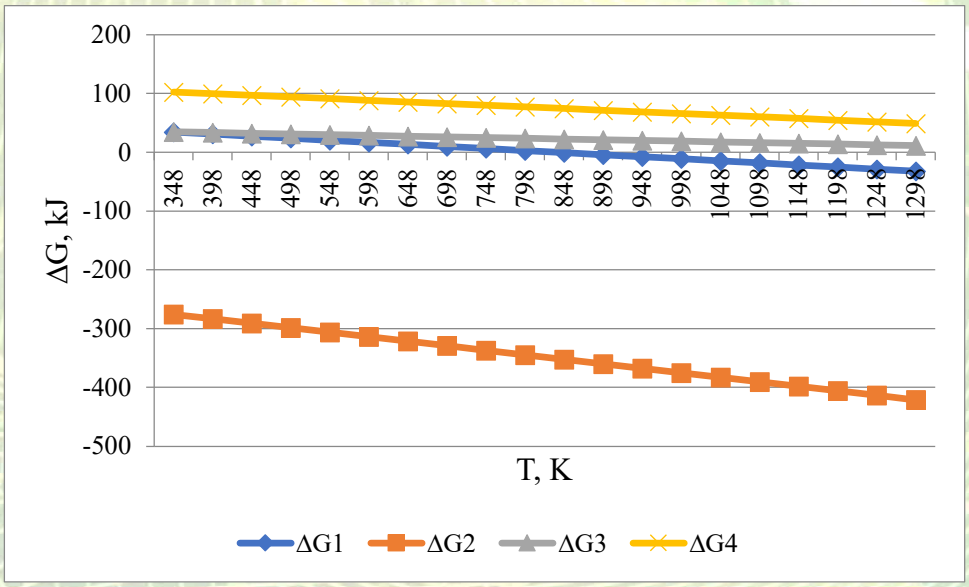
Vodorodotermik tiklanish reaksiyalarining turli haroratlardagi Gibbs energiyalari qiymatlari

№	T, K	ΔG_1^T	ΔG_2^T	ΔG_3^T	ΔG_4^T
1	348	34,408	-275,660	34,841	102,467

ISSN 3030-3907

2	398	30,905	-283,312	33,611	99,658
3	448	27,403	-290,965	32,380	96,848
4	498	23,901	-298,618	31,150	94,038
5	548	20,399	-306,271	29,920	91,229
6	598	16,897	-313,923	28,690	88,419
7	648	13,394	-321,576	27,460	85,609
8	698	9,892	-329,229	26,229	82,800
9	748	6,390	-336,881	24,999	79,990
10	798	2,888	-344,534	23,769	77,180
11	848	-0,614	-352,187	22,539	74,370
12	898	-4,117	-359,839	21,309	71,561
13	948	-7,619	-367,492	20,078	68,751
14	998	-11,121	-375,145	18,848	65,941
15	1048	-14,623	-382,798	17,618	63,132
16	1098	-18,125	-390,450	16,388	60,322
17	1148	-21,628	-398,103	15,158	57,512
18	1198	-25,130	-405,756	13,927	54,703
19	1248	-28,632	-413,408	12,697	51,893
20	1298	-32,134	-421,061	11,467	49,083

3-jadvalda keltirilgan barcha tiklanish reaksiyalarining termodinamik tahlilidan foydalanib, kuyindi tarkibidagi oksidlarni vodorod gazi ishtirokida qayta ishlash jarayonida oqib o‘tadigan barcha kimyoviy reaksiyalar uchun Ellingem diagrammasi tuzildi va u 1-rasmda tasvirlangan.



1-rasm. Oksid – vodorod sistemasida oqib o‘tadigan vodorodotermik reaksiyalarini umumiy Ellingem diagrammasi

ISSN 3030-3907

Oksid va vodorod sistemasida o‘qib o‘tadigan barcha vodorodotermik reaksiyalar ichida eng sekin boradigan (limitlovchi) reaksiya rux oksidining vodorod bilan tiklanish reaksiyasi bo‘lganligi sababli reaksiya to‘liq oqib o‘tishi uchun sistemaning optimal harorati aynan shu rux oksidining tiklanish reaksiyasi harorati bilan aniqlanadi. Lekin tadqiqotning maqsadi rux kuyindilarini kuchsiz tiklovchi xususiyatga ega bo‘lgan gazlar atmosferasida tiklash bo‘lganligi sababli sistemadagi rux oksidi va temir (II)-oksidlarining dastlabki metallik holiga qadar tiklanishi shart qilib olinmagan. Shuning uchun reaksion sistemada rux ferriti va magnetitning tiklanishi kuchsiz tiklanish shartini qanoatlantiradi. 1-rasmda tasvirlangan grafikdan shuni ko‘rishimiz mumkinki, endotermik reaksiyalarni inobatga olgan holda rux ferriti va magnetitning tiklanish jarayonlarining erkin energiyalarini solishtiradigan bo‘lsak, bunda limitlovchi reaksiya rux ferritining vodorod bilan tiklanishidir. Rux ferritining tiklanish jarayonining boshlanish nuqtasi 848 K (575 ^{o}C) haroratga muvofiq keldi. Ushbu haroratda magnetitning vodorod bilan tiklanish ehtimolligi juda yuqori. Jarayonning optimal haroratini aniqlashda uning kinetik xarakteristikasini ham bilish talab etiladi. Buning uchun Gibbs energiyasi qiymatlaridan foydalanib, kimyoviy reaksiyalarning muvozanat doimiyliklarini aniqlash kerak.

3-jadvaldagi erkin energiyalar qiymatlariga asoslanib, har bir vodorodotermik reaksiya uchun berilgan haroratlardagi kimyoviy muvozanat konstantasi aniqlandi va bu qiymatlar 4-jadvalda taqdim etilgan.

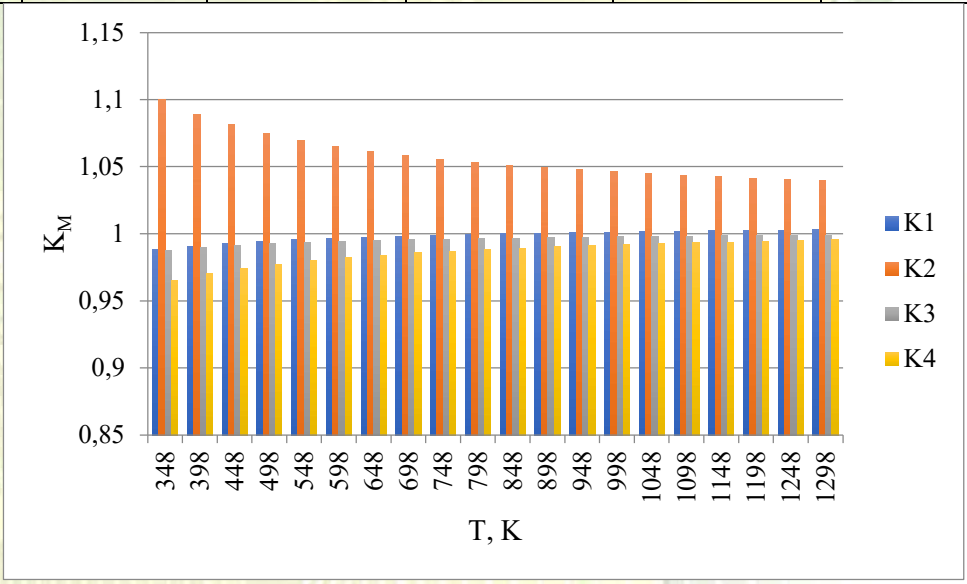
4-jadval.

Vodorodotermik tiklanish reaksiyalarining turli haroratlardagi muvozanat doimiyliklari qiymatlari

№	T, K	K_1	K_2	K_3	K_4
1	348	0,9882	1,1000	0,9880	0,9652
2	398	0,9907	1,0894	0,9899	0,9703
3	448	0,9927	1,0813	0,9913	0,9743
4	498	0,9942	1,0748	0,9925	0,9775
5	548	0,9955	1,0696	0,9935	0,9802
6	598	0,9966	1,0652	0,9942	0,9824
7	648	0,9975	1,0615	0,9949	0,9842
8	698	0,9983	1,0584	0,9955	0,9858
9	748	0,9990	1,0557	0,9960	0,9872
10	798	0,9996	1,0533	0,9964	0,9884
11	848	1,0001	1,0512	0,9968	0,9895
12	898	1,0006	1,0494	0,9971	0,9905
13	948	1,0010	1,0478	0,9975	0,9913

ISSN 3030-3907

14	998	1,0013	1,0463	0,9977	0,9921
15	1048	1,0017	1,0449	0,9980	0,9928
16	1098	1,0020	1,0437	0,9982	0,9934
17	1148	1,0023	1,0426	0,9984	0,9940
18	1198	1,0025	1,0416	0,9986	0,9945
19	1248	1,0028	1,0407	0,9988	0,9950
20	1298	1,0030	1,0398	0,9989	0,9955



2-rasm. Oksidlarni vodorodotermik tiklanish jarayonida muvozanat konstantasini haroratga bog‘liq ravishda o‘zgarishi

2-rasmda tasvirlangan grafikdan shuni ko‘rishimiz mumkinki, harorat 848 K (575 ^{o}C) ga yetganda limitlovchi reaksiya – rux ferritining tiklanish jarayoni vaqtida sistemada kimyoviy muvozanat qaror topadi va harorat 1298 K (1025 ^{o}C) ga yetganda muvozanat konstantasi yuqori qiymatga erishib reaksiya o‘ng tomonga, ya’ni mahsulot hosil bo‘lishi tomoniga siljiydi (K_M=1,003).

Oksidlarni vodorod gazi bilan tiklash usulining boshqa tiklovchi gazlar bilan tiklash usullaridan afzallik tomoni shundaki, vodorod gazi molekulalarining o‘lchami juda kichik (vodorod molekulasining diametri 27 nm) va shu sababli o‘lchami 27 nm dan katta bo‘lgan materiallarning ichki g‘ovaklarida vodorod molekulalari bemalol diffuziyalana oladi. Shuning uchun kukunsimon, sochiluvchan moddalarning metallurgiyasida tiklanish jarayonini vodorod ishtirokida olib borish ko‘proq samara beradi. Bunda jarayon optimal darajada oqib o‘tishi uchun tiklanish jarayonida vodorodning parsial bosimi yetarli darajada ta’minlab berilsa bas.

Ferrit–vodorod sistemasida olib borilgan termodinamik tahlil natijalariga ko‘ra, rux ferritining vodorod ishtirokida parchalanishi va rux hamda temirning ikki valentli holatga o‘tishi uchun jarayonning minimal termodinamik boshlanish

ISSN 3030-3907

harorati 848 K (575 °C) ga to‘g‘ri keladi. Aynan ushbu haroratdan boshlab $ZnFe_2O_4$ ning vodorod bilan tiklanish reaksiyasi uchun Gibbs erkin energiyasi manfiy qiymatga o‘tadi ($\Delta G_1<0$), bu esa ferrit kristall panjarasining buzilishi va ZnO hamda FeO (Fe^{2+}) fazalarining hosil bo‘lishi termodinamik jihatdan mumkin ekanligini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, FeO→Fe va ZnO→Zn reaksiyalarining mazkur harorat oralig‘ida erkin energiyasi musbat qiymatlarda saqlanib qolishi metallarni metallik holatgacha tiklashning ehtimoli past ekanligini bildiradi, bu esa qimmatbaho vodorod gazining ortiqcha sarf bo‘lishining oldini oladi. Jarayonning kinetik xususiyatlarini ham inobatga olgan holda, ferrit strukturalarini samarali buzish va keyingi sulfat kislotada tanlab eritishga tayyorlash uchun vodorodotermik tiklashning optimal harorat oralig‘i 898–998 K (625–725 °C) deb baholandi. Ushbu haroratlarda rux va temir birikmalari eriydigan oksid va ikki valentli holatlarga o‘tib, keying sulfat kislotada tanlab eritish tufayli ularning qattiq qoldiqdagi massa ulushi keskin kamayadi, natijada ikkilamchi kek tarkibida oltin va kumush kabi nodir metallarning konsentratsiyasi oshib, texnologik jihatdan qimmatli boyitma hosil qilish imkoniyati yuzaga keladi.

Mazkur natijalarni an’anaviy rux ferritini koks ishtirokida tiklash jarayonlari bilan qiyosiy tahlil qiladigan bo‘lsak, vodorodotermik usulning bir qator muhim texnologik va energetik ustunliklari namoyon bo‘ladi. Ma’lumki, uglerod yoki koks yordamida rux ferritining parchalanishi va ruxning ajralib chiqishi odatda 1100–1300 °C dan past bo‘lmagan haroratlarni talab qiladi, bu esa jarayonning yuqori energiya sig‘imi, yoqilg‘i sarfining ortishi va CO hamda CO_2 gazlarining katta miqdorda hosil bo‘lishi bilan tavsiflanadi. Bundan tashqari, koks bilan tiklash jarayonida ferrit strukturalarining to‘liq buzilishi ko‘pincha rux va temirning metallik holatgacha qaytarilishi bilan kechadi, bu esa texnologik jihatdan talab qilinmaydigan ortiqcha energiya sarfi hamda ruxning bug‘lanish orqali yo‘qotilish xavfini keltirib chiqaradi. Vodorodotermik tiklashda esa ferrit panjarasining buzilishi va metallarni ikki valentli holatgacha qaytarish 625–725 °C kabi nisbatan past haroratlarda amalga oshiriladi, bu energiya sarfini sezilarli darajada kamaytirish bilan birga, qimmatbaho vodorod gazidan maqsadli va tejamkor foydalanish imkonini beradi. Natijada jarayon uglerodli tiklash usullariga nisbatan past haroratli, kam chiqindili va keyingi sulfat kislotada tanlab eritish uchun optimal tayyorlangan mahsulot hosil qilish nuqtai nazaridan resurs-tejamkor va ekologik jihatdan afzal texnologik yechim sifatida baholanadi.

XULOSA. Ushbu ilmiy tadqiqotda rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalarini vodorodotermik usulda qayta ishlash jarayonining termodinamik va kinetik jihatlari tizimli ravishda o‘rganildi. Ferrit–vodorod sistemasida kechadigan asosiy va oraliq kimyoviy reaksiyalar

ISSN 3030-3907

tahlili asosida rux ferritining kristall panjarasini buzish va rux hamda temirni ikki valentli holatgacha qaytarish uchun zarur bo‘lgan minimal va optimal harorat sharoitlari ilmiy jihatdan asoslab berildi. O‘tkazilgan hisob-kitoblarga ko‘ra, rux ferritining vodorod bilan tiklanish jarayoni 848 K (575 °C) dan boshlab termodinamik jihatdan mumkin bo‘lib, jarayonning amaliy jihatdan samarali va barqaror borishi uchun optimal harorat oralig‘i 898–998 K (625–725 °C) deb belgilandi.

Tadqiqotning asosiy ilmiy yangiligi shundan iboratki, rux ferritlarini tiklashda metallarni metallik holatgacha qaytarish shart emasligi ilmiy asoslab berildi va faqat ikki valentli holatgacha (ZnO va FeO) tiklash ferrit strukturasini buzish uchun yetarli ekanligi ko‘rsatildi. Bu yondashuv qimmatbaho vodorod gazining ortiqcha sarfini oldini olish bilan birga, jarayonni energetik jihatdan sezilarli darajada tejamkor qiladi. Shuningdek, termodinamik hisoblashlar natijasida rux ferritining vodorod bilan tiklanishi butun jarayon uchun limitlovchi bosqich ekanligi aniqlanib, jarayon parametrlarini aynan ushbu reaksiya sharoitlariga moslash zarurligi ilmiy jihatdan asoslandi.

Olingan natijalar asosida vodorodotermik tayyorlov jarayoni an’anaviy uglerodli (koks bilan) tiklash usullari bilan qiyoslab baholandi. Aniqlanishicha, vodorodotermik usul rux ferritlarini 1100–1300 °C kabi yuqori haroratlarda metallik holatgacha tiklashni talab qiladigan koksli jarayonlarga nisbatan past haroratli, kam energiya sarflovchi va ekologik jihatdan qulay texnologik yechim hisoblanadi. Eng muhimi, mazkur yondashuv keyingi bosqichda sulfat kislotada tanlab eritish jarayonida rux va temirning eritmaga deyarli to‘liq o‘tishini ta’minlab, qattiq qoldiqda ularning massa ulushini keskin kamaytiradi. Natijada ikkilamchi kek tarkibida oltin, kumush kabi nodir metallarning konsentratsiyasi ortib, ularni sanoat miqyosida boyitishga yaroqli mahsulotga aylantirish imkoniyati paydo bo‘ladi.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari rux ishlab chiqarish texnogen chiqindilarini resurs-tejamkor va kam chiqindili texnologiyalar asosida qayta ishlash uchun ilmiy asoslangan yondashuvni taklif etadi hamda vodorodotermik tayyorlov jarayonini gidrometallurgik sxemalarga integratsiya qilish istiqbollarini ochib beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Hojiyev Sh.T., Xolikulov D.B., Xaydaraliyev X.R., Javliyev S.S., Movlanov A.S. Sfaleritni marganes dioksidi bilan oksidlovchi tanlab eritishning termodinamik imkoniyatlarini baholash // Kompozitsion materiallar. – 2025. – № 4. – B. 90–92.

ISSN 3030-3907

2. Hojiyev Sh.T., Xolikulov D.B., Xaydaraliyev X.R., Javliyev S.S., Movlanov A.S. Sulfidli rux boyitmasini pirolyuzit yordamida kislotali muhitda oksidlash yo‘li bilan tanlab eritish jarayonining kinetikasini tadqiq etish // Kompozitsion materiallar. – 2025. – № 4. – B. 158–160.
3. Хожиев Ш.Т., Холикулов Д.Б., Муталибхонов С.С., Шайманов И.И., Ма Г. Сравнительный термодинамический анализ флюсующих добавок Na_2O и CaO при восстановлении железа из силикатных шлаков черной металлургии // Черные металлы. – 2025. – № 9. – С. 12-18.
4. Khojiev Sh.T., Kholikulov D.B., Khaydaraliev Kh.R., Javliyev S.S., Movlanov A.S. Eco-Efficient Oxidative Leaching of Zinc Sulfide Concentrates Using Manganese Dioxide: A Thermodynamic and Process Analysis // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2025. – Vol. 9. – № 10. – P. 163–171.
5. Hojiyev Sh.T., O‘razaliyev Sh.B., Sayfiddinov A.A., Shodiyeva Z.Sh. Rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi ferrit strukturalarini is gazi ishtirokida parchalanishining termodinamik asoslari // Образование и наука в XXI веке. – 2025. – Вып. № 69–2, т. 1. – С. 40–53.
6. Khojiev Sh.T., Khaydaraliev K.R., Mutalibkhonov S.S., Khudoymuratov S.J. Chemical kinetics and interfacial electron transfer in the hydrazine reduction of zinc ferrite // Development of Science. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – P. 445–454.
7. Khojiev Sh.T., Khaydaraliev K.R., Mamarakhimov S.K., Eraliyev X.M. Thermodynamic insights into metallic iron-assisted reduction of spinel ferrites in zinc hydrometallurgical residues // Development of Science. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – P. 126–139.
8. Khojiev Sh.T., Kholikulov D.B., Khaydaraliev K.R. Effect of temperature on hydrometallurgical reductive-leaching of zinc cakes // Development of Science. – 2025. – Vol. 11, No. 1. – P. 143–154.
9. Hojiyev Sh.T., Xoliqulov D.B., Xaydaraliyev X.R. Rux, mis, kadmiy va temirning chiqindi-keklardan eritmaga o‘tish jarayonida kislota konsentrasiyasining roli // Development of Science. – 2025. – Vol. 11, No. 1. – P. 120–128. Khojiev Sh.T., Kholikulov D.B., Khaydaraliev Kh.R., Javliyev S.S., Movlanov A.S. Influence of Hydrazine Sulfate on the Redox Chemistry and Selective Dissolution of Zinc, Iron, Copper, and Cadmium from Metallurgical Wastes // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2025. – Vol. 9. – № 11. – P. 132-138.
10. Самадов А.У., Хожиев Ш.Т., Жалолов Б.А., Тошкодирова Р.Э., Музафарова Н.М. Термодинамические аспекты термической переработки

ISSN 3030-3907

цинксодержащих техногенных образований черной металлургии в углеродной среде // Черные металлы. – 2026. – № 1. – С. 83–88.
11. Khaydaraliev Kh.R., Khojiev Sh.T., Shodiyev M.T. Processing of Zinc Production Wastes and Recycling Opportunities // International Journal of Scientific Bulletin. – 2026. – Vol. 3, Issue 1. – P. 90–96.

ISSN 3030-3907