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 KEKLARINI RESURS-TEJAMKOR QAYTA ISHLASH UCHUN METANOTERMIK SELEKTIV TIKLASHNING TERMODINAMIK ASOSLARI

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
Sayfiddinov Asqarali Axmadali o‘g‘li
Olmaliq davlat texnika instituti, talaba, Olmaliq, O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada rux ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan keklar tarkibidagi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalarini metanotermik usulda selektiv tiklash jarayonining termodinamik asoslari o‘rganildi. Ferrit–metan gazi sistemasida ehtimoliy oksidlanish-qaytarilish reaksiyalari uchun entalpiya, entropiya va Gibbs erkin energiyasi qiymatlari hisoblab chiqildi hamda haroratning jarayonga ta’siri tahlil qilindi. Olingan natijalarga ko‘ra, 1250–1300 K harorat oralig‘ida ferrit va magnetit tarkibidagi temir past valentli yoki metallik holatga o‘tadi, rux esa oksid ko‘rinishida saqlanib qoladi. Bu holat klinker tarkibidan metallashgan temirni magnitli separatsiya orqali selektiv ajratib olish hamda keyingi sulfat kislota bilan tanlab eritish jarayonida kislota sarfini kamaytirish imkonini beradi. Taklif etilgan yondashuv rux keklarini kompleks va resurs-tejamkor qayta ishlash uchun istiqbolli texnologik yechim sifatida baholandi.

Kalit so‘zlar: rux keki, rux ferriti, metanotermik tiklash, metan gazi, selektiv tiklash, termodinamik tahlil, magnitli separatsiya, sulfat kislotada eritish.

Аннотация. В статье исследованы термодинамические основы селективного метанотермического восстановления ферритных фаз, содержащихся в цинковых кеках, образующихся при производстве цинка. Для системы «феррит–метан» рассчитаны изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса возможных окислительно-восстановительных реакций, а также проанализировано влияние температуры на протекание процессов. Установлено, что в интервале температур 1250–1300 K железо, входящее в состав феррита и магнетита, восстанавливается до двухвалентного или металлического состояния, тогда как цинк сохраняется в форме оксида. Это

ISSN 3030-3907

обеспечивает возможность селективного выделения металлизированного железа из клинкера методом магнитной сепарации и снижает расход серной кислоты на последующей стадии выщелачивания. Предложенный подход рассматривается как перспективное ресурсосберегающее решение для комплексной переработки цинковых кеков.

Ключевые слова: цинковый кек, цинковый феррит, метанотермическое восстановление, метан, селективное восстановление, термодинамический анализ, магнитная сепарация, сернокислотное выщелачивание.

Abstract. This paper investigates the thermodynamic fundamentals of selective methanothermal reduction of ferrite phases contained in zinc production residues. For the ferrite–methane system, the enthalpy, entropy, and Gibbs free energy changes of possible redox reactions were calculated, and the effect of temperature on the reduction behavior was analyzed. The results indicate that within the temperature range of 1250–1300 K, iron present in ferrite and magnetite phases is reduced to divalent or metallic states, while zinc remains in the oxide form. This enables selective separation of metallized iron from the clinker by magnetic separation and reduces sulfuric acid consumption during subsequent leaching stages. The proposed approach is considered a promising resource-efficient and environmentally acceptable solution for the comprehensive processing of zinc residues.

Keywords: zinc residue, zinc ferrite, methanothermal reduction, methane gas, selective reduction, thermodynamic analysis, magnetic separation, sulfuric acid leaching.

KIRISH.

Rux ishlab chiqarish jarayonlarida hosil bo‘ladigan texnogen keklar rangli metallurgiya sanoatining eng murakkab va muammoli chiqindilaridan biri hisoblanadi. Ushbu keklar tarkibida ruxning sezilarli qismi sulfat kislotada yomon eriydigan yoki umuman erimaydigan ferritli birikmalar, xususan $ZnFe_2O_4$ shaklida mavjud bo‘lib, bu holat ruxni gidrometallurgik usulda yuqori darajada ajratib olish imkoniyatini keskin cheklaydi [1]. Shu sababli ferrit strukturalarini buzish va ruxni eruvchan holatga o‘tkazishga qaratilgan yangi, energetik va resurs-tejamkor texnologik yondashuvlarni ishlab chiqish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi [2].

Ma’lumki, rux ferriti termodinamik jihatdan barqaror birikma bo‘lib, an’anaviy sulfat kislota bilan eritish sharoitlarida deyarli parchalanmaydi. Amaliyotda ferrit fazalarini buzish uchun yuqori haroratli pirometallurgik jarayonlar, koks yoki qattiq yoqilg‘i ishtirokidagi tiklash usullari qo‘llaniladi [3]. Biroq bunday texnologiyalar yuqori energiya sarfi, karbonat angidrid

ISSN 3030-3907

chiqindilarining ortishi va jarayonni aniq boshqarishdagi murakkabliklar bilan tavsiflanadi [4]. So‘nggi yillarda gazsimon qaytaruvchilar asosida olib boriladigan tiklovchi ishlov berish jarayonlari ekologik va texnologik nuqtai nazardan muqobil yechim sifatida qaralmoqda [5].

Rux keklari tarkibidagi $ZnFe_2O_4$ ferritining yuqori termodinamik barqarorligi ruxning sulfat kislotada selektiv va to‘liq eritilishiga jiddiy to‘sqinlik qiladi. Natijada umumiy rux chiqimi kamayadi, texnologik jarayonning iqtisodiy samaradorligi pasayadi va chiqindilar hajmi ortadi [6]. Ferrit strukturalarini buzmasdan turib, ruxni gidrometallurgik jarayonlarga samarali jalb etish amalda imkonsizdir. Shu bois, ferritni oldindan qayta ishlash bosqichini takomillashtirish muhim ilmiy va texnologik muammo sifatida namoyon bo‘lmoqda [7].

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, rux ferritini gazsimon qaytaruvchilar yordamida tiklash bo‘yicha tadqiqotlar mavjud bo‘lsa-da, metan (CH_4) gazi asosidagi tiklovchi atmosfera sharoitida ferrit–metan sistemasida kechadigan reaksiyalarning termodinamik barqarorligi va kinetik xususiyatlari yetarlicha chuqur o‘rganilmagan [8]. Xususan, ruxni oksid holatda saqlagan holda temirni past valentli holatga o‘tkazish imkoniyatlari, optimal harorat oralig‘i va gaz muhitining ta’siri bo‘yicha tizimli ilmiy tahlillar cheklangan [9].

Termodinamik hisob-kitoblar va avvalgi tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, metan gazi yuqori haroratlarda kuchli qaytaruvchi xususiyat namoyon etib, ferrit strukturasidagi temir oksidlarini qaytarish imkoniyatiga ega [10]. Bunda Zn–Fe–O–C–H sistemasida gaz-faza muvozanatlari muhim ahamiyat kasb etadi. Shu bilan birga, jarayon kinetikasi ferrit kristall panjarasining parchalanish tezligi va gaz–qattiq faza o‘zaro ta’siri bilan bevosita bog‘liq bo‘lib, bu masalalar chuqur ilmiy tahlilni talab etadi [11].

O‘zbekiston rangli metallurgiya korxonalarida, xususan rux ishlab chiqarish bilan bog‘liq texnologik jarayonlarda katta hajmdagi rux keklari hosil bo‘lmoqda [12]. Ushbu keklarni samarali qayta ishlash mamlakatning xomashyo bazasidan oqilona foydalanish, import o‘rnini bosuvchi mahsulotlar ishlab chiqarish va ekologik yuklamani kamaytirish nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega. Tabiiy gaz zaxiralarining mavjudligi metan asosidagi tiklovchi muhitdan foydalanishni iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq qiladi [13].

Ushbu tadqiqotning asosiy vazifasi rux keklari tarkibidagi ferrit strukturalarini metanotermik usulda qayta ishlash jarayonining termodinamik va kinetik qonuniyatlarini aniqlashdan iborat [14]. Tadqiqot doirasida ferrit–CH_4 sistemasida ehtimoliy kimyoviy reaksiyalar, ularning Gibbs erkin energiyasi, muvozanat sharoitlari hamda haroratning jarayonga ta’siri tahlil qilinadi [15].

ISSN 3030-3907

Mazkur ilmiy maqolaning maqsadi rux ferritini metan gazi ishtirokida tiklovchi atmosfera sharoitida qayta ishlash imkoniyatlarini ilmiy asoslash, ferrit strukturasini buzish orqali rux oksidini sulfat kislotada eriydigan holatga o‘tkazish uchun optimal termodinamik va kinetik shartlarni aniqlashdan iboratdir. Olingan natijalar rux keklarini gidrometallurgik qayta ishlash texnologiyalarini takomillashtirishga xizmat qilishi kutiladi.

TADQIQOT OBYEKTLARI VA METODIKASI. Ushbu tadqiqotning asosiy obyektlari sifatida rux ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan rux keki (kek) tarkibidagi asosiy ferrit va oksid fazalari — rux ferriti ($ZnFe_2O_4$), magnetit (Fe_3O_4), vyustit (FeO) hamda rux oksidi (ZnO) tanlab olindi. Tadqiqotda tiklovchi muhit sifatida tabiiy gaz tarkibidagi metan (CH_4) gazi qabul qilinib, oksid–metan sistemasida yuqori haroratlarda yuz beradigan ehtimoliy oksidlanish-qaytarilish reaksiyalari tizimi shakllantirildi. Asosiy e’tibor ferrit strukturasini buzish orqali ruxni oksid holatda saqlab qolgan holda temir oksidlarini past valentli holatlarga o‘tkazish imkoniyatlarini aniqlashga qaratildi, chunki bu holat keyingi gidrometallurgik bosqichlarda ruxning sulfat kislotada eruvchanligini ta’minlash uchun muhim hisoblanadi.

Tadqiqot metodikasi termodinamik hisoblashlar va ularning tahliliga asoslangan bo‘lib, metan gazi ishtirokida boradigan tiklanish reaksiyalarining standart sharoitdagi (298 K) entalpiya (ΔH), Gibbs erkin energiyasi (ΔG) va entropiya (ΔS) qiymatlari Gess qonuni asosida aniqlandi. Olingan termodinamik funksiyalar asosida haroratga bog‘liq $\Delta G(T)$ tenglamalari tuzilib, 348–1298 K (75–1025 °C) oralig‘ida reaksiyalarning sodir bo‘lish ehtimoli baholandi. Shuningdek, har bir reaksiya uchun berilgan haroratlarda kimyoviy muvozanat konstantalari hisoblanib, Ellingem diagrammalari va grafik tahlillar yordamida selektiv tiklanish sharoitlari asoslab berildi. Ushbu yondashuv ferrit–metan sistemasida kechadigan jarayonlarning termodinamik ustuvorligini aniqlash hamda optimal harorat oralig‘ini belgilash imkonini berdi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA. Kuchsiz tiklovchi muhitga ega bo‘lgan gazlar aralashmasidagi tiklovchi moddalar ichida metan (CH_4) gazining hajmiy ulushi eng kam bo‘lganligi tufayli rux keki tarkibidagi komponentlar bilan metan gazining to‘qnashishlari soni ham kam bo‘ladi. Rux keki tarkibidagi oksidlarning yuqori haroratda metan gazi bilan ta’sirlashish jarayonlarining kimyoviy reaksiyalari quyidagilardan iborat:

$$4ZnFe_2O_4 + CH_4 = 4ZnO + 8FeO + CO_2 + 2H_2O \quad (1)$$

$$4Fe_3O_4 + CH_4 = 12FeO + CO_2 + 2H_2O \quad (2)$$

$$4FeO + CH_4 = 4Fe + CO_2 + 2H_2O \quad (3)$$

$$4ZnO + CH_4 = 4Zn + CO_2 + 2H_2O \quad (4)$$

ISSN 3030-3907

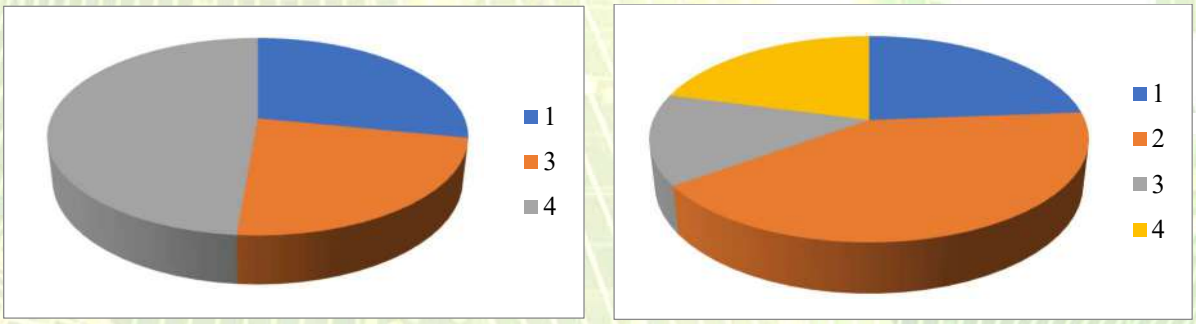
3.9-jadvalda berilgan qiymatlardan foydalanib, Gess qonuni bo‘yicha metan gazi bilan boradigan tiklanish kimyoviy reaksiyalarining standart sharoitdagi natijalari hisoblandi va ular 1-jadvalda taqdim etilgan.

1-jadval.

Metanotermik tiklanish reaksiyalarining standart sharoitdagi (298 K) qiymatlari

№	Kimyoviy reaksiyalar	ΔH_{reak}, kJ	ΔG_{reak}, kJ	ΔS_{reak}, J/K
1	$4ZnFe_2O_4 + CH_4 = 4ZnO + 8FeO + CO_2 + 2H_2O$	347,18	212,9	452,17
2	$4Fe_3O_4 + CH_4 = 12FeO + CO_2 + 2H_2O$	-777,54	-857,02	784,21
3	$4FeO + CH_4 = 4Fe + CO_2 + 2H_2O$	285,66	205,06	270,41
4	$4ZnO + CH_4 = 4Zn + CO_2 + 2H_2O$	600,14	481,86	396,77

1-jadvalda taqdim etilgan termodinamik hisoblashlarning standart sharoitdagi qiymatlaridan shuni bilish mumkinki, 1, 3, 4-kimyoviy reaksiyalar endotermik reaksiyalar bo‘lib, ularning standart Gibbs energiyasi qiymatlari musbat, ya’ni 298 K da reaksiya o‘z-o‘zidan sodir bo‘la olmaydi. Faqatgina 2-kimyoviy reaksiyagina ekzotermik bo‘lib, faollanish energiyasi berilganda magnetit nanozarrachalari bilan metan gazi orasida standart sharoitda oksidlanish-qaytarilish jarayoni sodir bo‘ladi. Magnetitning tiklanishida katta miqdorda issiqlik ajralib chiqsa, qolgan uchta kimyoviy reaksiyada esa katta miqdorda issiqlik yutilishi kuzatildi. Issiqlikning yutilishida va natijada sistema entropiyasining o‘rgarishida har bir kimyoviy reaksiyaning hissasini tasavvur qilish uchun ularni 1-rasmda aylana diagramma ko‘rinishida tasvirlandi.



a) b)

1-rasm. Metan gazi ishtirokida boradigan tiklanish reaksiyalarining entalpiya va entropiya qiymatlarining ulushlarda ifodalanishi: a) issiqlik yutilishida tiklanish reaksiyalarining hissasi; b) tiklanish reaksiyalaridan so‘ng sistema entropiyasining o‘zgarishida har bir reaksiyaning hissasi

1-a rasmda tasvirlangan aylana diagrammadan shuni ko‘rish mumkinki, 4-kimyoviy reaksiyada eng ko‘p miqdorda issiqlik yutiladi. Shu sababga ko‘ra bu

ISSN 3030-3907

reaksiyaning borish harorati ancha yuqori qiymatlarni tashkil etadi. 1-b rasmda esa aynan shu 4-kimyoviy reaksiya sodir bo‘lishi natijasida reaksion sistemadagi zarrachalarning tartibsizlik darajasi ortib boradi.

1-jadvaldagi qiymatlardan chiqarilgan xulosaga asosan haroratning ortishi har bir tiklanish reaksiyasiga qanday ta’sir ko‘rsatishi orasidagi bog‘liqlikning tegishli matematik ifodalar tuzildi va ular quyidagicha ko‘rinishga ega:

1.	$4ZnFe_2O_4 + CH_4 = 4ZnO + 8FeO + CO_2 + 2H_2O$	$\Delta G_1^T = 347,18 – 0,45217T$
2.	$4Fe_3O_4 + CH_4 = 12FeO + CO_2 + 2H_2O$	$\Delta G_2^T = -777,54 – 0,78421T$
3.	$4FeO + CH_4 = 4Fe + CO_2 + 2H_2O$	$\Delta G_3^T = 285,66 – 0,27041T$
4.	$4ZnO + CH_4 = 4Zn + CO_2 + 2H_2O$	$\Delta G_4^T = 600,14 – 0,39677T$

Hisoblab chiqilgan matematik ifodalarga asoslanib, reaksion sistemada harorat har 50 birlikka ko‘tarilganda har bir tiklanish kimyoviy jarayonlarining sodir bo‘lish ehtimolligi aniqlandi. Olingan natijalar 2-jadvalda taqdim etilgan.

2-jadval.

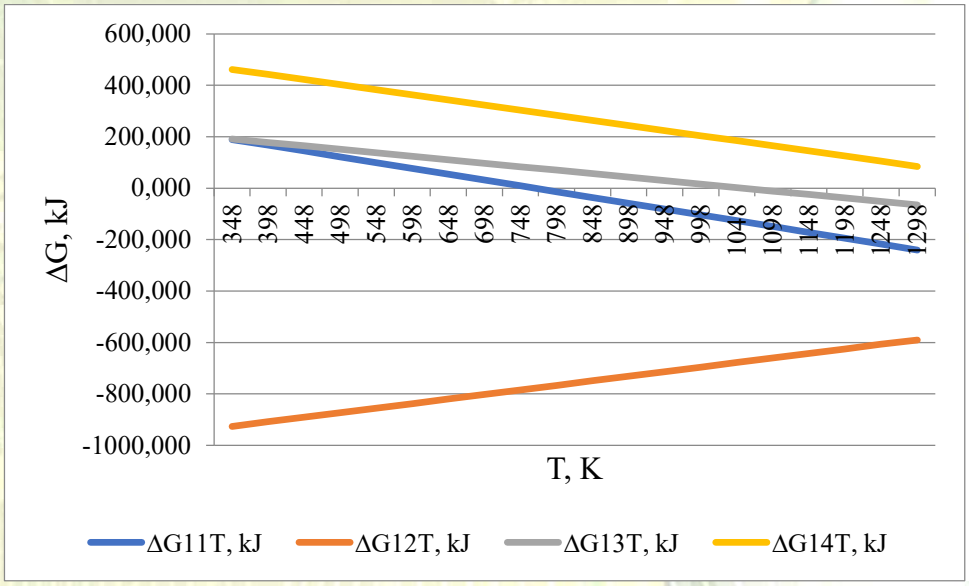
Metan gazi ishtirokida oqib o‘tadigan tiklanish reaksiyalarining turli haroratlardagi Gibbs energiyalari qiymatlari

№	T, K	ΔG_{11}^T, kJ	ΔG_{12}^T, kJ	ΔG_{13}^T, kJ	ΔG_{14}^T, kJ
1	348	189,825	-926,403	191,557	462,064
2	398	167,216	-908,673	178,037	442,226
3	448	144,608	-890,943	164,516	422,387
4	498	121,999	-873,213	150,996	402,549
5	548	99,391	-855,483	137,475	382,710
6	598	76,782	-837,753	123,955	362,872
7	648	54,174	-820,024	110,434	343,033
8	698	31,565	-802,294	96,914	323,195
9	748	8,957	-784,564	83,393	303,356
10	798	-13,652	-766,834	69,873	283,518
11	848	-36,260	-749,104	56,352	263,679
12	898	-58,869	-731,375	42,832	243,841
13	948	-81,477	-713,645	29,311	224,002
14	998	-104,086	-695,915	15,791	204,164
15	1048	-126,694	-678,185	2,270	184,325
16	1098	-149,303	-660,455	-11,250	164,487
17	1148	-171,911	-642,726	-24,771	144,648
18	1198	-194,520	-624,996	-38,291	124,810
19	1248	-217,128	-607,266	-51,812	104,971

ISSN 3030-3907

20	1298	-239,737	-589,536	-65,332	85,133

2-jadvalda 348 – 1298 K (75 – 1025 ºC) haroratlar intervalida metan gazi ishtirokida oqib o‘tadigan tiklanish kimyoviy reaksiyalarining tegishli Gibbs energiyalari taqdim etilgan bo‘lib, harorat ortib borishi bilan barcha endotermik reaksiyalarning yuz berish ehtimolligi ortib bordi. Masalan, rux ferritining tiklanish reaksiyasida (1-reaksiya) Gibbs energiyasi 798 K (525 ºC) haroratda manfiylashadi, ya’ni rux ferritining tiklanish reaksiyasi kurtak ota boshlaydi. Buni 2-rasmda ham ko‘rish mumkin.



2-rasm. Oksid – metan gazi sistemasida oqib o‘tadigan tiklanish reaksiyalarining umumiy Ellingem diagrammasi

2-rasmda tasvirlangan grafikda oksid va metan gazi sistemasida oqib o‘tadigan tiklanish kimyoviy reaksiyalarining orasida magnetitning tiklanish reaksiyasi (2-reaksiya) ekzotermik reaksiya bo‘lganligi tufayli haroratning ko‘tarilishi to‘g‘ri kimyoviy reaksiya tezligini pasayishiga olib keldi. Lekin bu reaksiya tadqiq etilgan haroratlar intervalining har bir qiymatida manfiy ko‘rsatkichlarni namoyon qildi va bu holat mazkur reaksiyaning berilgan haroratlar oralig‘ida albatta sodir bo‘lishini anglatadi.

2-jadvaldagi erkin energiyalar qiymatlariga asoslanib, metan gazi ishtirokida boradigan har bir tiklanish reaksiyasi uchun berilgan haroratlardagi kimyoviy muvozanat konstantasi aniqlandi va bu qiymatlar 3-jadvalda taqdim etilgan.

3-jadvalgi qiymatlar va bu qiymatlarni 3-rasmda gistogrammalar ko‘rinishida tasvirlangan grafikdan shuni anglash mumkinki, temir (II)-oksidining (vyustit) metan gazi yordamida tiklanishida (3-reaksiya) haroratda 1050 K ga yetganda reaksion sistemada kimyoviy muvozanat qaror topadi va harorat 1098 K (825 ºC) ga yetganda esa kimyoviy reaksiya tezligi o‘ng tomonga, ya’ni mahsulot (temir kukunlari) hosil bo‘lishi tomoniga siljiydi. Ammo berilgan haroratlar

ISSN 3030-3907

intervalida rux oksidining metan gazi ishtirokida tiklanishi yuz bermaydi. Buning sababi rux oksidining metan gazi yordamida metallik rux hosil bo‘lishiga qadar tiklanishida juda katta miqdorda issiqlik talab qilinishidir.

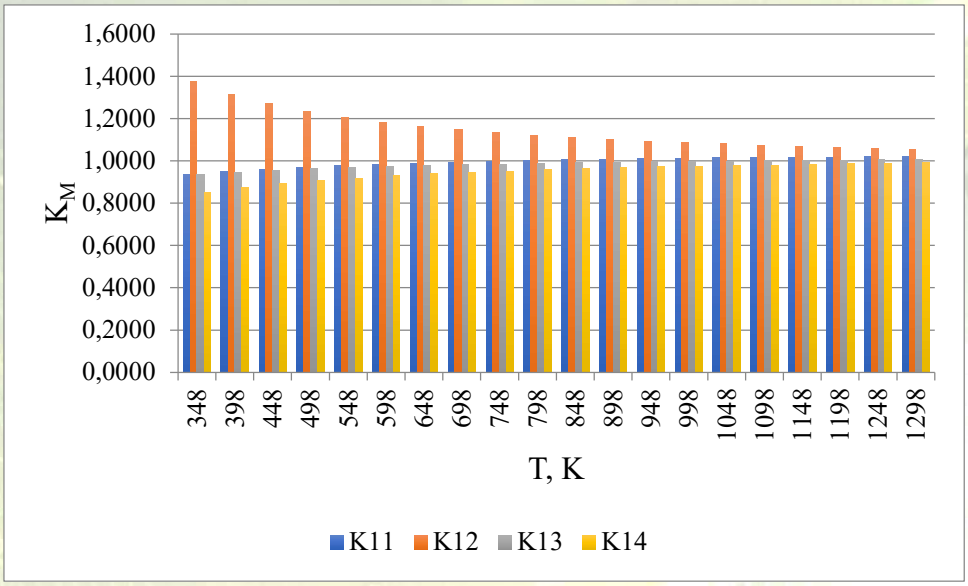
3-jadval.

Metan gazi ishtirokida boradigan tiklanish reaksiyalarining turli haroratlardagi muvozanat doimiyliklari qiymatlari

№	T, K	K_1	K_2	K_3	K_4
1	348	0,9349	1,3776	0,9359	0,8523
2	398	0,9507	1,3162	0,9476	0,8748
3	448	0,9609	1,2704	0,9568	0,8927
4	498	0,9710	1,2349	0,9642	0,9073
5	548	0,9779	1,2067	0,9703	0,9194
6	598	0,9847	1,1836	0,9754	0,9296
7	648	0,9897	1,1645	0,9797	0,9383
8	698	0,9946	1,1483	0,9834	0,9458
9	748	0,9985	1,1345	0,9867	0,9524
10	798	1,0021	1,1226	0,9895	0,9581
11	848	1,0053	1,1122	0,9920	0,9633
12	898	1,0079	1,1030	0,9943	0,9679
13	948	1,0107	1,0948	0,9963	0,9720
14	998	1,0126	1,0875	0,9981	0,9757
15	1048	1,0150	1,0810	0,9997	0,9791
16	1098	1,0165	1,0751	1,0012	0,9821
17	1148	1,0187	1,0697	1,0026	0,9850
18	1198	1,0197	1,0648	1,0039	0,9875
19	1248	1,0217	1,0603	1,0050	0,9899
20	1298	1,0231	1,0562	1,0061	0,9921

Metan gazi ishtirokida rux rux kekilari tarkibidagi oksidlarning tiklanish jarayonlarida oqib o‘tadigan kimyoviy reaksiyalar orasida eng sekin boruvchi (limitlovchi) jarayon bu rux oksidining tiklanishidir. Lekin olib borilgan tadqiqotda rux oksidining tiklanishi maqsad qilib olinmaganligi tufayli bunday holatda limitlovchi reaksiya vyustitning tiklanish reaksiyasi degan xulosaga kelindi.

ISSN 3030-3907



3-rasm. Oksidlarni metan gazi bilan tiklanish jarayonida muvozanat konstantasini haroratga bog‘liq ravishda o‘zgarishi

Vyustitning metan gazi ishtirokida tiklanish reaksiyasi endotermik bo‘lgani uchun haroratning ortishi reaksiya tezligini oshiradi. Lekin selektiv tiklash jarayonida yuqori harorat talab qilinmaganligi va rux kekilarni chuqur tiklash shart emasligi sababli 1298 K (1025 ºC) harorat rux kekilarni metan gazi bilan tanlab (selektiv) tiklanish reaksiyalari uchun optimal harorat bo‘la oladi degan xulosaga kelindi.

Olib borilgan termodinamik tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, metan gazi ishtirokida rux metali rux keklari tarkibidagi ferrit va temir oksid fazalarining tiklanish reaksiyalari haroratga kuchli bog‘liq bo‘lib, selektiv tiklash sharoitini ta’minlash uchun haroratning to‘g‘ri tanlanishi hal qiluvchi ahamiyatga ega. Hisoblangan Gibbs erkin energiyasi qiymatlariga ko‘ra, rux ferritining metan bilan tiklanish reaksiyasi 798 K (≈525 °C) dan boshlab termodinamik jihatdan mumkin bo‘la boshlaydi, ya’ni ushbu haroratdan yuqorida ferrit strukturasining parchalanishi va temir oksidlarining past valentli holatlarga o‘tishi kuzatiladi. Shu bilan birga, magnetitning (Fe_3O_4) metan gazi bilan tiklanishi butun tadqiq etilgan haroratlar oralig‘ida manfiy ΔG qiymatlariga ega bo‘lib, temirning Fe^{2+} (FeO) yoki metallik Fe holatiga o‘tishi uchun qulay sharoit mavjudligini ko‘rsatadi.

Biroq rux oksidining metan gazi yordamida metallik rux holatigacha tiklanishi uchun juda katta issiqlik talab etilishi aniqlangan bo‘lib, 1298 K (≈1025 °C) gacha bo‘lgan haroratlarda ham ushbu reaksiya termodinamik jihatdan noqulay bo‘lib qoladi. Bu holat tadqiqot maqsadlari nuqtai nazaridan muhim afzallik hisoblanadi, chunki ruxning oksid holatda saqlanib qolishi klinker tarkibida metallashgan temirni magnitli separatsiya usuli bilan selektiv ajratib olish imkonini beradi. Natijada temir miqdori kamaygan klinkerni keyingi bosqichda sulfat kislota

ISSN 3030-3907

eritmasida qayta ishlashda kislota sarfi sezilarli darajada kamayadi hamda eritmaning temir va boshqa yo‘ldosh elementlar bilan zararlanish ehtimoli pasayadi. Shu asosda, ferrit va magnetitdagi temirni tiklash, biroq ruxni oksid holatda saqlab qolish shartlarini to‘liq ta’minlaydigan optimal metanotermik tiklash harorati 1250–1300 K (≈975–1025 °C) oralig‘i deb baholandi.

Mazkur harorat oralig‘ida ferrit strukturasining buzilishi natijasida rux oksidi sulfat kislota eritmasida oson eriydigan holatga o‘tadi, temir esa asosan metallik yoki past valentli oksid shaklida klinkerda jamlanadi. Bu holat keyingi gidrometallurgik tanlab eritish jarayonida rux va temirning eritmaga deyarli to‘liq o‘tishini ta’minlab, qattiq qoldiqdagi ularning massa ulushini keskin kamaytiradi yoki butkul bartaraf etadi. Natijada ikkilamchi qattiq kek tarkibida oltin, kumush kabi nodir va qimmatbaho metallarning konsentratsiyasi ortib, ularni sanoat miqyosida ajratib olish uchun yaroqli boyitma shakllanishiga sharoit yaratiladi.

XULOSA. Ushbu tadqiqotda rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi sulfat kislotada erimaydigan ferrit strukturalarini buzish va ruxni eruvchan oksid holatiga o‘tkazishga qaratilgan metanotermik tiklash jarayonining termodinamik qonuniyatlari tizimli ravishda o‘rganildi. Ferrit–metan gazi sistemasida ehtimoliy oksidlanish-qaytarilish reaksiyalari uchun Gibbs erkin energiyasi, entalpiya va entropiya o‘zgarishlari hisoblab chiqildi hamda jarayonning haroratga bog‘liqligi asoslab berildi. Olingan natijalar rux ferriti va magnetitdagi temirning metan gazi yordamida past valentli yoki metallik holatga o‘tishi uchun qulay termodinamik sharoitlar mavjudligini ko‘rsatdi.

Termodinamik tahlilga ko‘ra, rux ferritining tiklanish jarayoni taxminan 798 K dan boshlab mumkin bo‘lsa-da, selektiv tiklash shartlarini to‘liq ta’minlash nuqtai nazaridan 1250–1300 K (975–1025 °C) harorat oralig‘i optimal deb topildi. Ushbu haroratlarda temir oksidlarining tiklanishi termodinamik jihatdan qulay bo‘lib, rux oksidining metallik rux holatigacha tiklanishi yuz bermaydi. Bu holat ruxni oksid shaklida saqlab qolgan holda, metallashgan temirni klinker tarkibidan magnitli separatsiya usuli bilan selektiv ajratib olish imkonini beradi.

Metanotermik tiklashdan so‘ng temir miqdori kamaygan klinkerni sulfat kislota eritmasida qayta ishlash kislota sarfini qisqartiradi, eritmaning temir va boshqa yo‘ldosh elementlar bilan ifloslanishini oldini oladi hamda tanlab eritish jarayonining texnologik samaradorligini oshiradi. Shu bilan birga, rux va temirning qattiq qoldiqda qolish darajasining keskin kamayishi ikkilamchi kek tarkibida oltin, kumush kabi nodir metallarning konsentratsiyasini oshirish imkonini yaratadi va ularni sanoat miqyosida qayta ishlashga yaroqli boyitmaga aylantiradi. Umuman olganda, taklif etilgan metanotermik selektiv tiklash yondashuvi rux keklarini

ISSN 3030-3907

kompleks, resurs-tejamkor va ekologik jihatdan maqbul qayta ishlash uchun ilmiy asoslangan istiqbolli texnologik yechim ekanligi aniqlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Khaydaraliev Kh.R., Hojiyev Sh.T., Shaymanov I.I., Ramazanova Z.B. Zinc prices and main producing countries in the last decade // “Kimyo sanoatining dolzarb muammolari, innovatsion yechimlari va istiqbollari” nomli xalqaro ilmiy-amaliy anjumani to‘plami, Olmaliq, 1-2 noyabr, 2024 y. S. 294-295.
2. Khojiev Sh.T., Rakhmataliev Sh.A., Tulaganov M.I., Rakhmonaliyev M.M. Modern technologies of zinc production // Моя профессиональная карьера, 2022, 35(8). C. 266-275.
3. Kholikulov D.B., Khaydaraliev Kh.R., Khojiev Sh.T. Mineralogical investigation of zinc cake generated in Almalyk zinc production // Proceedings of the International Conference on Integrated Innovative Development of Zarafshan Region: Achievements, Challenges and Prospects. – Navoi, 2025. – P. 401–402.
4. Холикулов Д.Б., Хайдаралиев Х.Р., Хожиев Ш.Т., Муталибхонов С.С. Термодинамический анализ выщелачивания феррита цинка серной кислотой с использованием гидразина сульфата // Химическая технология и техника: материалы докладов 89-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2025. – С. 87–90.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Hojiyev Sh.T., O‘razaliyev Sh.B., Sayfiddinov A.A., Shodiyeva Z.Sh. Rux ishlab chiqarish keklari tarkibidagi ferrit strukturalarini is gazi ishtirokida

ISSN 3030-3907

parchalanishining termodinamik asoslari // Образование и наука в XXI веке. – 2025. – Вып. № 69–2, т. 1. – С. 40–53.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Самадов А.У., Хожиев Ш.Т., Жалолов Б.А., Тошкодирова Р.Э., Музафарова Н.М. Термодинамические аспекты термической переработки цинксодержащих техногенных образований черной металлургии в углеродной среде // Черные металлы. – 2026. – № 1. – С. 83–88.

15. 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