(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

UO‘K: 662.74:546.73

10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.3

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OKSID FAZALARNI SELEKTIV ERITISH VA GERMANIYNI BOYITISH MAQSADIDA QO‘NG‘IR KO‘MIR KULINING XLORID KISLOTADAGI ERUVCHANLIGINI TERMODINAMIK BAHOLASH



Xasanov Abdirashid Saliyevich

Texnika fanlari doktori (DSc), professor, “Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJ, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: a.xasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622
Science ID: DTV-1225-0005



Karshiboyev Sherzod Begmaxamat o‘g‘li

Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent, Olmaliq davlat texnika instituti, “Metallurgiya” kafedrasi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: karshiboev@odti.uz
ORCID ID: 0009-0004-8097-0804
Science ID: FTV-0125-0002



Kayirbayev Isa Baxtiyar o‘g‘li

Tayanch doktorant, Olmaliq davlat texnika instituti, “Konchilik ishi” kafedrasi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: isakayirbayev@gmail.com
ORCID ID: 0009-0009-2488-5011



Yormatov Dostonbek Ashurmamat o‘g‘li

Assistent, Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti, “Neft-gaz va konchilik ishi” kafedrasi, Termiz, O‘zbekiston
E-mail: dostonyormatov2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-4423-4140
Science ID: MSD-0425-0004

Annotatsiya. *Mazkur tadqiqotda “Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ qo‘ng‘ir ko‘mir kulining xlorid kislotadagi eruvchanlik xususiyatlari termodinamik tahlil asosida o‘rganildi. Reaksiyalar uchun Gibbs erkin energiyasi va entalpiya qiymatlari hisoblanib, haroratning ortishi bilan oksidlarning eritmadagi barqarorligi va faolligi baholandi. Natijalar CaO, MgO, Fe_2O_3, MnO, PbO, ZnO va CuO kabi oksidlarning HCl muhitida eruvchanligini va eritmaga o‘tishini, Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, MoO_3, WO_3 hamda GeO_2 kabi oksidlarning esa refrakter xususiyatga ega bo‘lib, asosan qattiq qoldiqda saqlanishini ko‘rsatdi. Hisob-kitoblarga ko‘ra, kulning 23,18 % qismi eritmaga o‘tishi, 76,82 % qismi esa qattiq fazada qolishi mumkin. Qattiq fazada, xususan, GeO_2 ning to‘planishi germaniyni keyingi yuqori haroratli qayta ishlash bosqichida ajratib olish uchun qulay sharoit yaratadi. Olingan natijalar ko‘mir kulini xlorid kislotada bosqichma-bosqich selektiv eritish orqali germaniyni konsentrlash va qimmatli metallarni texnogen chiqindilardan ajratib olish texnologiyasini ishlab chiqish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.*

Kalit so‘zlar: *qo‘ng‘ir ko‘mir kuli, xlorid kislota, termodinamik tahlil, oksid fazalar, Gibbs erkin energiyasi, refrakter oksidlar, germaniy, selektiv eritish, metall ajratib olish, texnogen chiqindilar.*

Received: 19.09.2026 | Accepted: 01.10.2026 | Issue publication: 10.10.2026

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСТВОРИМОСТИ ЗОЛЫ БУРОГО УГЛЯ В СОЛЯНОЙ КИСЛОТЕ С ЦЕЛЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ОКСИДНЫХ ФАЗ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ГЕРМАНИЯ

Хасанов Абдирашид Салиевич
Доктор технических наук (DSc), профессор, АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», Алмалык, Узбекистан

Каршибоев Шерзод Бегмахамат угли
Доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент кафедры «Металлургия» Алмалыкского государственного технического института, Алмалык, Узбекистан

Кайырбаев Иса Бахтияр угли
Базовый докторант кафедры «Горное дело» Алмалыкского государственного технического института, Алмалык, Узбекистан

Ёрматов Достонбек Ашурмамат угли
Ассистент кафедры «Нефтегазовое и горное дело» Термезского государственного университета инженерии и агротехнологий, Термез, Узбекистан

Аннотация. *В настоящем исследовании на основе термодинамического анализа изучены особенности растворения золы бурого угля АО «Ангренская тепловая электростанция» в соляной кислоте. Рассчитаны значения свободной энергии Гиббса и энтальпии соответствующих реакций, а также оценены устойчивость и реакционная способность оксидных фаз в зависимости от температуры. Установлено, что такие оксиды, как CaO, MgO, Fe_2O_3, MnO, PbO, ZnO и CuO, растворяются в среде HCl и преимущественно переходят в жидкую фазу, тогда как Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, MoO_3, WO_3 и GeO_2 обладают рефрактерными свойствами и преимущественно сохраняются в твёрдом остатке. Согласно расчётам, около 23,18 % компонентов золы переходит в раствор, тогда как 76,82 % остаётся в твёрдой фазе. Накопление рефрактерных оксидов, особенно GeO_2, в твёрдом остатке создаёт благоприятные условия для последующего извлечения германия высокотемпературной переработкой. Полученные результаты формируют научную основу для разработки технологии поэтапного селективного выщелачивания угольной золы соляной кислотой с целью концентрирования германия и извлечения ценных металлов из техногенных отходов.*

Ключевые слова: *зола бурого угля, соляная кислота, термодинамический анализ, оксидные фазы, свободная энергия Гиббса, рефрактерные оксиды, германий, селективное выщелачивание, извлечение металлов, техногенные отходы.*

THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF BROWN COAL ASH SOLUBILITY IN HYDROCHLORIC ACID FOR SELECTIVE LEACHING OF OXIDE PHASES AND GERMANIUM CONCENTRATION

Khasanov Abdirashid Saliyevich
Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, JSC "Almalyk Mining and Metallurgical Complex", Almalyk, Uzbekistan

Karshiboyev Sherzod Begmakhamat ugli
PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metallurgy, Almalyk State Technical Institute, Almalyk, Uzbekistan

Kayirbayev Isa Bakhtiyar ugli
Basic Doctoral Student, Department of Mining Engineering, Almalyk State Technical Institute, Almalyk, Uzbekistan

Yormatov Dostonbek Ashurmamat ugli
Assistant Lecturer, Department of Oil and Gas and Mining Engineering, Termez State University of Engineering and Agrotechnologies, Termez, Uzbekistan

Abstract. *This study investigates the hydrochloric acid dissolution behavior of lignite coal ash from Angren Thermal Power Plant JSC based on thermodynamic analysis. The Gibbs free energy and enthalpy changes of the relevant reactions were calculated, and the stability and reactivity of oxide phases in the leaching system were evaluated as a function of temperature. The results indicate that oxides such as CaO, MgO, Fe_2O_3, MnO, PbO, ZnO, and CuO are soluble in HCl and preferentially transfer into the liquid phase, whereas Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, MoO_3, WO_3, and GeO_2 exhibit refractory behavior and predominantly remain in the solid residue. According to the calculations, approximately 23.18% of the coal ash components can dissolve into the solution, while 76.82% remain in the solid phase. The accumulation of refractory oxides in the solid residue, particularly GeO_2, creates favorable conditions for the subsequent recovery of germanium through high-temperature processing. The obtained results provide a scientific basis for developing a staged hydrochloric acid leaching process aimed at selectively dissolving soluble oxide phases, concentrating germanium, and recovering valuable metals from coal ash as a technogenic secondary resource.*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Keywords: *lignite coal ash, hydrochloric acid, thermodynamic analysis, oxide phases, Gibbs free energy, refractory oxides, germanium, selective leaching, metal recovery, technogenic waste.*

Kirish. Germaniy (Ge) — yuqori texnologiyalarda (yarim o‘tkazgichlar, optika, infraqizil sensorlar va quyosh panellarida) qo‘llaniladigan qiymati yuqori elementdir. Hozirgi kunda germaniy odatda rux, qo‘rg‘oshin va mis boyitmalari qayta ishlashda yon mahsuloti sifatida olinadi, ammo ushbu manbalar cheklangan bo‘lishi va iqtisodiy jihatdan samaradorligini oshirish zarurati yangi xomashyo alternativalarini qidirishga olib kelmoqda (masalan, ko‘mir kul va changlari) [1].

Ko‘mirni yonish jarayonida germaniy organik o‘zak matritsaga integratsiyalangan holda xromit shaklda joylashgan bo‘lishi mumkin. Yonish paytida germaniy selektiv ravishda uchuvchan holatga o‘tadi va kul hamda chang mahsulotlarida konsentratsiyalangan shaklda yig‘iladi (masalan, ko‘mir kulida Ge konsentratsiyasi asl ko‘mirga nisbatan o‘n baravarga oshishi imkoniyati mavjud). Shu sababli ko‘mir kul va changlari germaniy ajratib olish uchun istiqbolli yon mahsulot xomashyosi hisoblanadi [2].

Germaniyni samarali ajratib olish texnologiyasini ishlab chiqishda eng maqbul xomashyo manbasini aniqlash — ya’ni rux boyitmalari va ko‘mir yoqishdan hosil bo‘ladigan kul-changlar orasidan optimal variantni tanlash — muhim ilmiy va amaliy vazifalardan biridir. Germaniyni ajratib olish jarayonining samaradorligi, avvalo, kuldagi germaniy miqdori, uning mineralogik holati va bog‘lanish shakli bilan bevosita bog‘liqdir.

Shu bois, ko‘mir kulidan germaniyni kompleks ajratib olish bosqichlarini — xususan, kislotali termik ishlov berish (≈450°C), distillyatsiya va germaniy tetraxlorid ($GeCl_4$) hosil bo‘lish jarayonlarining termodinamik asoslarini chuqur o‘rganish zarur. Bunda yuqori haroratda konsentrlangan xlorid kislotaning bug‘lanishi va faollashuvi natijasida reaktor idishlari materiali tezroq yemirilishi kuzatiladi, bu esa texnologik jarayonning barqarorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Mazkur nojo‘ya ta’sirni kamaytirish uchun 450°C da sarflanadigan kislota miqdorini cheklash talab etiladi.

Biroq ko‘mir kulida germaniy birikmalari juda past konsentratsiyada bo‘lganligi sababli, xlorid kislotasi bilan o‘zaro ta’sirlashuvni ta’minlash uchun kislota sarfini oshirishga to‘g‘ri keladi. Shu sababli, jarayonni optimallashtirish maqsadida dastlab past haroratda suyultirilgan HCl eritmalari yordamida kul tarkibidagi kislotalarda oson eruvchan komponentlarni eritib chiqarish maqsadga muvofiqdir. Natijada germaniy oksidining nisbiy konsentratsiyasi ortadi va olingan mahsulot keyingi yuqori haroratli kislotali termik ishlov berish yoki ishqoriy muhitda ajratib olish jarayonlari uchun maqbul xomashyoga aylanadi.

Shunday qilib, germaniyni ko‘mir kulidan ajratib olishning ilmiy asoslangan, bosqichma-bosqich texnologik konsepsiyasini ishlab chiqish ushbu yo‘nalishdagi dolzarb ilmiy vazifalardan biri hisoblanadi.

An’anaviy usullarda germaniy asosan rux rudalaridan olinadi, chunki rux boyitmalarida germaniy nisbatan yuqori konsentratsiyada bo‘lishi mumkin. Bu esa kimyoviy ajratishni iqtisodiy jihatdan qulay qiladi. Biroq, butun dunyo bo‘yicha rux rudalaridan olinadigan germaniy miqdori cheklangan bo‘lib (faqat yon mahsulot sifatida olinadi), shuning uchun tadqiqotchilar alternativ xomashyolarga — ko‘mir kuliga e’tibor qaratmoqda [3].

Ko‘mirni yoqishdan hosil bo‘lgan kul va changlari germaniy uchun istiqbolli ikkilamchi manba sifatida alohida ahamiyatga ega, chunki ular katta hajmda hosil bo‘ladigan va texnologik jihatdan topish oson bo‘lgan chiqindilar hisoblanadi. Bunday materiallarda germaniy nisbatan yuqori konsentratsiyada to‘planishi mumkinligi, chiqindilarni resurs sifatida qayta ishlash imkoniyatini beradi [4]. Shu bilan birga, ushbu manbalarni qayta ishlashda bir qator texnologik murakkabliklar mavjud: kul va changlardagi germaniy konsentratsiyasining pastligi ajratib olish tannarxini oshiradi, mineralogik tarkibining murakkabligi esa tanlab eritish (leaching), ekstraksiya va uchirib haydab olish (volatilizatsiya) jarayonlarini qiyinlashtiradi. Germaniy atomlarining silikat va aluminosilikat tuzilmalarida kimyoviy jihatdan barqaror bog‘langan holatda bo‘lishi jarayonni qo‘shimcha

termodinamik va kimyoviy tahlilni talab qiladi. Shunday qilib, ko‘mir kulidan germaniyni ajratib olish texnologiyasini ishlab chiqishda murakkab mineralogik tarkibni hisobga olgan holda samarali gidrometallurgik va fizik-kimyoviy yondashuvlarni birlashtirish zarur [5].

Ko‘mir kul va changlaridan germaniyni ajratib olish murakkab, ammo istiqbolli texnologik jarayon bo‘lib, u samarali nazariy yondashuv va ilmiy asosga ega bo‘lishni talab qiladi. Germaniyni ajratib olishning konseptual sxemasi ketma-ket bosqichlardan iborat: xom ashyoni oldindan tayyorlash va fizik ajratish, germaniy fazalarini faollashtirish maqsadida qizdirish (roasting), kislota yoki ishqorli eritmalar yordamida eritish (leaching), so‘ngra selektiv ajratish va tozalash (chlorination–distillation, solvent extraction, ion exchange, cho‘ktirish) bosqichlari orqali germaniy birikmalarini olish, nihoyat ularni qaytarish va toza metall shakliga keltirish. Ushbu bosqichlarning har biri jarayonning umumiy samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi, ayniqsa germaniyni $GeCl_4$ shaklida ajratish va uni distillatsion tozalash usullarini termodinamik jihatdan chuqur o‘rganish texnologiyaning asosiy ilmiy muammolaridan biridir. Shu bois kul va changlardan germaniyni ajratish jarayonini takomillashtirishda fizik-kimyoviy jarayonlarning ketma-ketligi va ularning o‘zaro bog‘liqligini chuqur tahlil etish zarur [6].

Germaniyni $GeCl_4$ shaklida distillatsion ajratish texnologiyasi hozirgi davrda germaniy resurslarini qayta tiklash va ikkilamchi manbalardan samarali foydalanishning eng istiqbolli yo‘nalishlaridan biri sifatida e’tirof etilmoqda. Ushbu usulning mohiyati GeO_2 ning yuqori harorat va yuqori konsentratsiyali HCl muhitida osonlik bilan $GeCl_4$ ga aylanishi va uning past qaynash harorati (~86 °C) tufayli distillatsiya yo‘li bilan ajratilishi imkoniyatiga asoslanadi. Bunda distillatsiya natijasida yuqori qaynash haroratiga ega bo‘lgan boshqa metall birikmalar eritmada qoladi, bu esa germaniy oksidining tozaligini ta’minlaydi hamda jarayonning selektivligini oshiradi.

Mazkur tadqiqotning maqsadi asosan termodinamik qonuniyatlarga tayangan holda, ko‘mir kuli komponentlari bilan xlorid kislotaning o‘zaro ta’sirini aniqlash va yuz beradigan kimyoviy reaksiyalarni inobatga olib qoladigan qattiq erimagan qoldiqda germaniyning konsentratsiyasini sezilarli darajada oshirish imkoniyatlarini baholashga qaratilgan. Olingan natijalar nafaqat germaniy ajratib olish samaradorligini oshirish, balki energiya va kislota sarfini kamaytirish, chiqindilarni qayta ishlash orqali ekologik yuklamani pasaytirish va iqtisodiy jihatdan maqbul texnologik yechimlarni ishlab chiqishga xizmat qiladi.

Tadqiqot materiallari va metodlari. Tadqiqot obyekti sifatida “Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ ning qo‘ng‘ir ko‘mirni yoqishdan qolgan kuli tanlandi.

1-jadval

“Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ ning qo‘ng‘ir ko‘mirni yoqishdan qolgan kulning kimyoviy va moddiy tarkibi

No	Elementar tarkib	Massa ulushi, %	Moddiy tarkib	Massa ulushi, %
1	Cl	0,0131	Cl_2O	0,0161
2	Ra	(0,0007)	RaO	0,0008
3	Mg	1,75	MgO	2,9020
4	Al	11,8	Al_2O_3	22,2961
5	Si	18,6	SiO_2	39,7928
6	S	0,480	SO_3	1,1985
7	K	1,03	K_2O	1,2408
8	Ca	8,35	CaO	11,6835
9	Ti	0,506	TiO_2	0,8443
10	V	0,0207	V_2O_5	0,0370
11	Cr	(0,0015)	Cr_2O_3	0,0022
12	Mn	0,164	MnO	0,2118
13	Fe	4,32	Fe_2O_3	6,1766
14	Co	(0,0112)	CoO	0,0142
15	Cu	0,0064	CuO	0,0080
16	Zn	0,305	ZnO	0,3796
17	Ga	0,0028	Ga_2O_3	0,0036
18	Ge	0,0057	GeO_2	0,0071
19	As	0,0214	As_2O_5	0,0230
20	Rb	0,0115	Rb_2O	0,0143
21	Sr	0,119	SrO	0,1407
22	Y	0,0052	Y_2O_3	0,0066
23	Zr	0,165	ZrO_2	0,2229
24	Nb	0,0020	Nb_2O_5	0,0029
25	Mo	0,0058	MoO_3	0,0087
26	Ag	0,0008	Ag	0,0009
27	Cd	0,0012	CdO	0,0014
28	Sn	0,0014	SnO	0,0018
29	Ba	0,162	BaO	0,1809
30	W	0,0265	WO_3	0,0334
31	Ir	0,0033	Ir	0,0039
32	Pt	0,0019	Pt	0,0022
33	Pb	0,0773	PbO	0,0833
34	Eu	0,0869	Eu_2O_3	0,1006

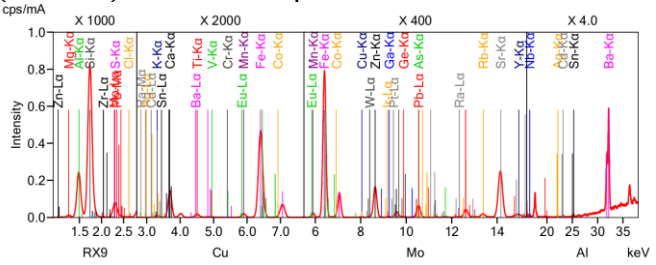
Qo‘ng‘ir ko‘mirni yoqishdan hosil bo‘lgan kulning kimyoviy (1-jadval) va moddiy tarkibini (2-jadval) aniqlash uchun kompleks analitik metodlardan foydalanildi. Namunalarning asosiy oksidli tarkibi (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O, SO_3 va boshqalar) rentgen-flyuorestsent spektroskopiyasi (XRF) yordamida aniqlangan.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Kulning fazoviy va mineral tarkibini o‘rganish uchun rentgen-fazali tahlil (XRD) metodi qo‘llanildi.

Namunalarning mikrostrukturasi va morfologik xususiyatlari skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) hamda energiya dispersiv tahlil (EDS) usullari yordamida o‘rganildi. Shuningdek, termogravimetrik tahlil (TGA/DTG) yordamida kulning termik barqarorligi va yo‘qotiladigan massasi baholandi.

Namunalardagi uglerod, vodorod, oltingugurt va kislorod miqdori elementar analizator yordamida aniqlanib (1-rasm), kulning umumiy moddiy tarkibi (oksidlar) hisoblab chiqildi.



1-rasm. “Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ qo‘ng‘ir ko‘mir kulining kimyoviy tarkibini aniqlash uchun olingan rentgen-flyuorestsent (XRF) spektri.

Xlorid kislotasi muhitida “Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ qo‘ng‘ir ko‘mir kulining komponentlarini qayta ishlashning termodinamik imkoniyatlari izobar-izotermik sharoitlarda Gibbs energiyasini minimallashtirish usuli yordamida o‘rganildi. Reaksiyalarning barqarorligi va mahsulotlarning hosil bo‘lish ehtimoli 25–120 °C harorat oralig‘ida HSC Chemistry dasturida hisoblab chiqildi.

Natijalar va muhokama. Termodinamik tahlilni amalga oshirishda dastlab 1-jadvalda taqdim etilgan “Angren IES” AJ qo‘ng‘ir ko‘mirni yoqishdan qolgan kulining oksidli komponentlari bilan xlorid kislotasi orasida boradigan kimyoviy reaksiyalar tuzib chiqildi va ular 2-jadvalda taqdim etilgan.

2-jadvalda keltirilgan termodinamik hisob-kitoblarga ko‘ra, standart sharoitda (T=298,15 K; p=1 bar) Al_2O_3, TiO_2, MoO_3, WO_3, As_2O_3, GeO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, Y_2O_3 va Ga_2O_3 oksidlari xlorid kislota (HCl) ta’siriga nisbatan yuqori barqarorlik namoyon etadi. Bu oksidlarning erish yoki reaksiyaga kirishish jarayonlari uchun hisoblangan Gibbs erkin energiyasi musbat qiymatga ega bo‘lib, ularning standart sharoitda kimyoviy jihatdan inertligini va HCl bilan reaksiyaning o‘z-o‘zidan borib o‘tmasligini ko‘rsatadi.

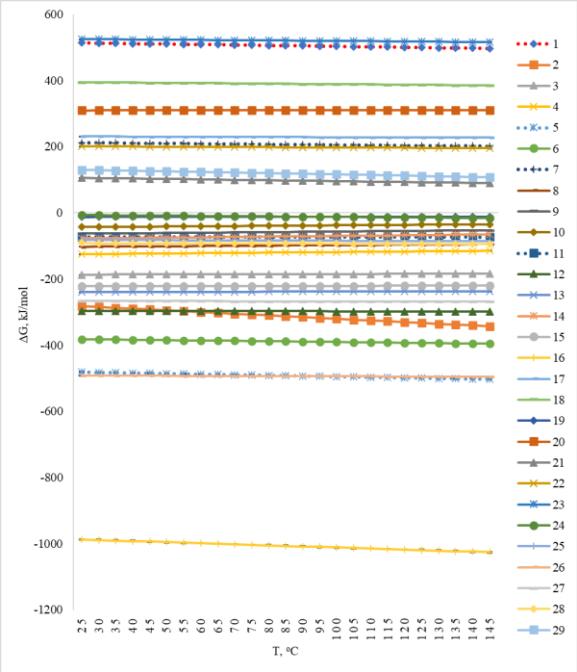
2-jadval

Har bir oksidning HCl bilan reaksiyasi, reaksiya mahsulotlari va reaksiyaning xususiyati

No	Reaksiya tenglamasi	Gibbs energiyasi tenglamasi
1	$Al_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2O$	ΔG_1= 555-0,14*T
2	$Fe_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2FeCl_3 + 3H_2O$	ΔG_2= -130,3-0,5094*T
3	$CaO + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O$	ΔG_3= -194+0,0234*T
4	$MgO + 2HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O$	ΔG_4= -150,55+0,085*T
5	$K_2O + 2HCl \rightarrow 2KCl + H_2O$	ΔG_5= -427,4-0,1809*T
6	$Na_2O + 2HCl \rightarrow 2NaCl + H_2O$	ΔG_6= -348,5-0,1129*T
7	$TiO_2 + 4HCl \rightarrow TiCl_4 + 2H_2O$	ΔG_7= 236,8-0,0852*T
8	$MnO + 2HCl \rightarrow MnCl_2 + H_2O$	ΔG_8= -121,7+0,0634*T
9	$ZnO + 2HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2O$	ΔG_9= -88,8+0,0858*T
10	$CuO + 2HCl \rightarrow CuCl_2 + H_2O$	ΔG_{10}= -65,0+0,0722*T
11	$PbO + 2HCl \rightarrow PbCl_2 + H_2O$	ΔG_{11}= -68,12-0,01416*T
12	$BaO + 2HCl \rightarrow BaCl_2 + H_2O$	ΔG_{12}= -295,3-0,0067*T
13	$SrO + 2HCl \rightarrow SrCl_2 + H_2O$	ΔG_{13}= -244,7+0,017*T
14	$CoO + 2HCl \rightarrow CoCl_2 + H_2O$	ΔG_{14}= -106,0+0,0959*T
15	$Cr_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2CrCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{15}= -225,0+0,0108*T
16	$V_2O_5 + 6HCl \rightarrow 2VOCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{16}= -892,1-0,3204*T
17	$MoO_3 + 6HCl \rightarrow MoCl_6 + 3H_2O$	ΔG_{17}= 240,6-0,0332*T
18	$WO_3 + 6HCl \rightarrow WCl_6 + 3H_2O$	ΔG_{18}= 418,47-0,0798*T
19	$SnO + 2HCl \rightarrow SnCl_2 + H_2O$	ΔG_{19}= -14,02+0,00392*T
20	$As_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2AsCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{20}= 309,4+0,0029*T
21	$GeO_2 + 4HCl \rightarrow GeCl_4 + 2H_2O$	ΔG_{21}= 145,3-0,1336*T
22	$ZrO_2 + 4HCl \rightarrow ZrCl_4 + 2H_2O$	ΔG_{22}= 214,1-0,045*T
23	$Nb_2O_5 + 10HCl \rightarrow 2NbCl_5 + 5H_2O$	ΔG_{23}= 547,4-0,07565*T
24	$Y_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2YCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{24}= 14,22-0,0718*T
25	$Eu_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2EuCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{25}= -72,1-0,0337*T
26	$Rb_2O + 2HCl \rightarrow 2RbCl + H_2O$	ΔG_{26}= -483,2-0,0296*T
27	$RaO + 2HCl \rightarrow RaCl_2 + H_2O$	ΔG_{27}= -262,0-0,0157*T
28	$CdO + 2HCl \rightarrow CdCl_2 + H_2O$	ΔG_{28}= -84,6-0,0243*T
29	$Ga_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2GaCl_3 + 3H_2O$	ΔG_{29}= 185,4-0,1865*T

Boshqa barcha oksidlarning HCl bilan reaksiyalari esa manfiy $\Delta G°$ qiymatga ega bo‘lib, ular termodinamik jihatdan qulay (spontan) jarayonlar hisoblanadi. Shu boisdan, mazkur oksidlar standart sharoitda xlorid kislota bilan osonlikcha reaksiyaga kirishadi va mos ravishda metall xlorid hamda suv hosil bo‘lishi mumkin.

Endi, jarayonning termodinamik xususiyat-larini to‘liq baholash uchun haroratning ortishi kimyoviy reaksiyalar yo‘nalishi va ularning o‘tish darajasiga qanday ta’sir ko‘rsatishini ko‘rib chiqish maqsadga muvofiqdir. Harorat o‘zgarishi Gibbs erkin energiyasining qiymatini o‘zgartiradi, bu esa o‘z navbatida reaksiyaning o‘z-o‘zidan borish imkoniyatini hamda oksidlarning xlorid kislota muhitidagi barqarorlik darajasini belgilaydi. Shu bois, keyingi bosqichda haroratning ortishi bilan reaksiyalar termodinamik barqarorligining o‘zgarish tendensiyalari tahlil qilinadi.



1-rasm. "Angren IES" AJ qo'ng'ir ko'mirini yoqishdan hosil bo'lgan kuldagi oksidlarning xlorid kislota bilan ta'siri Gibbs energiyasining haroratga bog'liqligi.

1-rasmda "Angren IES" AJ qo'ng'ir ko'mirining yoqilishi natijasida hosil bo'lgan kul tarkibidagi oksidli komponentlar bilan xlorid kislotasi o'rtasida eritma muhitida kechadigan kimyoviy reaksiyalar uchun harorat ortishining Gibbs erkin energiyasiga ta'siri aks ettirilgan. Tadqiqotda harorat standart sharoit (25°C) dan boshlab 145°C gacha, har 5°C qadam bilan o'zgarish oralig'ida o'rganildi. Jarayon suvli muhitda amalga oshirilgani sababli, suvning bug'lanishi hisobga olinib, 145°C dan yuqori haroratdagi o'zgarishlar tahlil doirasiga kiritilmadi. 1-rasmdagi grafikda 1 dan 29 gacha raqamlangan Gibbs energiyasining o'zgarish egri chiziqlari 2-jadvalda taqdim etilgan kimyoviy reaksiyalarning tartib raqamiga muvofiq ifodalangan.

1-rasmda keltirilgan grafik tahlil natijalariga ko'ra, "Angren IES" AJ qo'ng'ir ko'mir kulidagi oksidlarning xlorid kislota bilan reaksiyaga kirishish jarayonlarida Gibbs erkin energiyasining haroratga bog'liqligi aniqlangan. Grafikdan ko'rinadiki, ko'pchilik metall oksidlari (Fe_2O_3, CaO, MgO, ZnO, CuO, PbO, MnO, Cr_2O_3 va boshqalar) uchun ΔG qiymatlari butun harorat oralig'ida manfiy bo'lib, bu ularning xlorid kislota bilan o'z-o'zidan boruvchi, termodinamik jihatdan qulay reaksiyalar ekanligini ko'rsatadi. Aksincha, Al_2O_3, TiO_2, MoO_3, WO_3, ZrO_2, Nb_2O_5, Ga_2O_3 va GeO_2 kabi chidamli oksidlar uchun ΔG qiymatlari musbat bo'lib qoladi, bu esa ularning yuqori barqarorligini va past haroratlarda eritmaga o'tmasligini bildiradi. Harorat ortishi bilan ayrim oksidlar (masalan, GeO_2, Ga_2O_3, Y_2O_3) uchun ΔG qiymatining pasayish tendensiyasi kuzatiladi, bu esa ma'lum darajada reaksiyaning termodinamik qulayligini oshiradi. Umuman olganda, olingan natijalar kul tarkibini HCl eritmasida selektiv eritish imkoniyatini ko'rsatadi: asosiy metall oksidlar eritmaga o'tadi, chidamli oksidlar esa qattiq fazada saqlanib, ularni keyingi qayta ishlash bosqichida ajratib olish uchun imkon yaratadi.

Hisob-kitob natijalariga ko'ra, "Angren IES" kulining HCl eritmasida nisbatan pastroq haroratlarda ishlov berilishi natijasida kulning taxminan to'rtdan biri (23,18%) eritmaga o'tishi mumkinligi aniqlandi, qolgan uch qismi (76,82%) esa qattiq qoldiq sifatida saqlanib qolishi termodinamik imkoniyatlarni o'rganib chiqish bilangina aniqlandi. Eritmaga o'tgan fraksiya asosan temir, rux, kalsiy, magniy, qo'rg'oshin, marganets, kobalt va boshqa asosiy oksidlar asosida shakllangan bo'ladi. Qattiq fazada esa kremniy, alyuminiy, titan, germaniy, zirkoniy, molibden, volfram va nodir metallar oksidlari jamlangan bo'lib, ular keyingi bosqichlarda qo'shimcha termik yoki ishqoriy ishlov uchun istiqbolli obyekt hisoblanadi.

Xlorid kislotada kulning eruvchan komponentlarini eritib olish natijasida erimaydigan fazada germaniy, galliy va indiyning nisbiy miqdori ortadi. Dastlabki kulning 23,18% massasi eritmaga o'tganligi sababli, qoldiq faza (76,82%)da ushbu elementlarning konsentratsiyasi 30–35% ga oshgan deb qayd etildi.

Hisob-kitoblarga ko'ra, germaniyning miqdori dastlabki 0,0057% dan 0,0074% gacha, galliyniki esa 0,0028% dan 0,0036% gacha ko'tarilgan. Bu natija kulning dastlabki massasining kamayishi hisobiga nisbiy konsentratsiyaning oshishi, ya'ni "sun'iy boyish" hodisasini tasdiqlaydi.

Shunday qilib, HCl bilan dastlabki bosqichda kislotada eruvchan komponentlarni tanlab eritish orqali kul qoldig'ida germaniy, galliy va indiy elementlarini boyitilgan ikkilamchi xomashyo

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

shaklida to‘plash imkoniyati hosil bo‘ladi. Bu esa keyingi bosqichda yuqori haroratli kislotali-termik yoki ishqoriy eritma bilan ishlov berishda ushbu noyob elementlarni ko‘proq konsentratsiyali shaklda ajratib olish imkonini beradi.

Xulosa. O‘tkazilgan termodinamik tahlillar natijalariga ko‘ra, “Angren issiqlik elektr stansiyasi” AJ qo‘ng‘ir ko‘mirini yoqishdan hosil bo‘lgan kul tarkibidagi oksidlarning xlorid kislotasi bilan o‘zaro ta’sirlashish xususiyatlari aniqlanib, ularning haroratga bog‘liq barqarorlik darajalari baholandi. Hisob-kitoblar natijasi shuni ko‘rsatdiki, CaO, MgO, Fe_2O_3, MnO, PbO, ZnO, CuO kabi oksidlar HCl muhitida termodinamik jihatdan qulay, o‘z-o‘zidan boruvchi reaksiyalar hosil qilib, eritmaga o‘tadi. Aksincha, Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, MoO_3, WO_3 va GeO_2 kabi chidamli oksidlar yuqori barqarorlik namoyon etadi hamda past haroratlarda eritmaga o‘tmaydi.

Haroratning ortishi bilan ayrim chidamli oksidlar, jumladan GeO_2 uchun Gibbs erkin energiyasining pasayish tendensiyasi kuzatilib, 100–150 °C atrofida ularning reaksiya faolligi ortadi. Shunday qilib, germaniyni ajratib olish jarayonida dastlab past haroratda suyultirilgan HCl eritmasida asosiy oksidlarni eritib chiqarish, so‘ngra qattiq qoldiqda konsentratsiyalangan GeO_2 ni yuqori haroratli bosqichda (≈450°C) qayta ishlash maqsadga muvofiqdir.

Termodinamik hisob-kitoblarga asoslanib, HCl eritmasida ishlov berish natijasida kulning taxminan 23,18% qismi eritmaga o‘tishi, 76,82% qismi esa qattiq qoldiq sifatida saqlanishi aniqlangan. Qattiq fazada asosan kremniy, alyuminiy, titan, zirkoniy, volfram, molibden va germaniy oksidlari to‘planadi. Shu bois, bunday selektiv eritish jarayoni germaniy oksidining nisbiy kontsentratsiyasini oshirib, uni keyingi bosqichlarda samarali ajratib olish imkonini yaratadi.

Umuman olganda, o‘rganilgan natijalar ko‘mir kulini xlorid kislota yordamida bosqichma-bosqich qayta ishlash orqali germaniyni konsentrlash va ajratib olish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi hamda energiya va kislota sarfini kamaytirish, chiqindilarni resurs sifatida qayta ishlash va ekologik yuklamani pasaytirish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] Arroyo, F., & Fernández-Pereira, C. (2008). Hydrometallurgical recovery of germanium from coal gasification fly ash: Solvent extraction method. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(9), 3186–3191. https://doi.org/10.1021/ie7016948

[2] Rudnik, E. (2025). Challenges and opportunities in hydrometallurgical recovery of germanium from coal by-products. Molecules, 30(8), 1695. https://doi.org/10.3390/molecules30081695

[3] Xu, D., Chen, Y. W., Guo, H., Liu, H. Q., Xue, Y. D., Zhang, W. F., & Sun, Y. C. (2013). Review of germanium recovery technologies from coal. Applied Mechanics and Materials, 423–426, 565–573. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.565

[4] Stadnichenko, T. M. (1953). Concentration of germanium in the ash of American coals. U.S. Geological Survey.

[5] You, J. va boshqalar. (2025). “Co-extraction and enrichment of Ge, Sb and As from coal measure germanium-containing dust by reductive volatilization” nomi bilan Separation and Purification Technology, 376, 134156 sifatida topildi. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134156

[6] Bo, W., Wu, J., Miao, Z., & Wan, K. (2024). Germanium extraction from lignite using gravity separation combined with low-temperature sintering and chlorinated distillation. Separation and Purification Technology, 329, 125215. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125215

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Xasanov, A. S., Karshiboyev, S. B., Kayirbayev, I. B., & Yormatov, D. A. (2026). Oksid fazalarni selektiv eritish va germaniyni boyitish maqsadida qo‘ng‘ir ko‘mir kulining xlorid kislotadagi eruvchanligini termodinamik baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3-1). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.3