ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME - 9

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 9

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.

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

MAGNIYNI ELEKTROLIZ USULIDA OLISH TEXNOLOGIYASI

Mamarajabov Davronbek Mamarajab o‘g‘li
Toshkent kimyo-texnologiya instituti tayanch doktoranti

Annotatsiya. Ushbu maqolada magniy (Mg) metalini sanoat miqyosida elektroliz usulida olishning asosiy texnologik jarayonlari, elektrokimyoviy reaksiyalar mexanizmi, xom ashyo turlari, elektrolizyor konstruksiyalari va ularning texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlari batafsil tahlil qilinadi. Dow, I.G. Farben, Norsk Hydro, VAMI kabi etakchi sanoat jarayonlari solishtirilib, har birining afzalliklari va kamchiliklari ko‘rsatiladi. Maqola metallurgiya, kimyo-texnologiya va materiallar fani sohasidagi mutaxassislar uchun mo‘ljallangan.

Kalit so‘zlar: magniy, elektroliz, $MgCl_2$, eritilgan tuz, katod, anod, tok unumdorligi, Dow jarayoni, I.G. Farben jarayoni, Norsk Hydro, VAMI, suvsizlantirish.

Аннотация. В данной статье представлен подробный анализ основных технологических процессов промышленного производства металлического магния (Mg) методом электролиза, механизма электрохимических реакций, типов сырья, конструкций электролизеров и их технико-экономических показателей. Проведено сравнение ведущих промышленных процессов, таких как Dow, I.G. Farben, Norsk Hydro, VAMI, и показаны преимущества и недостатки каждого из них. Статья предназначена для специалистов в области металлургии, химической технологии и материаловедения.

Ключевые слова: магний, электролиз, $MgCl_2$, расплавленная соль, катод, анод, эффективность тока, процесс Dow, процесс I.G. Farben, Norsk Hydro, VAMI, дегидратация.

Abstract. This article provides a detailed analysis of the main technological processes for the industrial production of magnesium (Mg) metal by electrolysis, the mechanism of electrochemical reactions, types of raw materials, electrolyzer designs and their technical and economic indicators. Leading industrial processes such as Dow, I.G. Farben, Norsk Hydro, VAMI are compared, and the advantages and disadvantages of each are shown. The article is intended for specialists in the field of metallurgy, chemical technology and materials science.

Keywords: magnesium, electrolysis, $MgCl_2$, molten salt, cathode, anode, current efficiency, Dow process, I.G. Farben process, Norsk Hydro, VAMI, dehydration.

KIRISH.

Magniy (Mg) — davriy jadvalning II A guruhiga mansub, atom massasi 24,31 g/mol, zichligi 1,74 g/sm³ bo‘lgan engil konstruktiv metal. U yer qobig‘ida uchinchi o‘rinda turuvchi eng ko‘p tarqalgan metallardan biri bo‘lib, dengiz suvida o‘rtacha 0,13% (1,3 g/l) miqdorda mavjud. Magniyning po‘lat bilan solishtirganda og‘irligi 4,5 marta, alyuminiy bilan solishtirganda 1,5 marta yengildir. Magniy va

ISSN 3030-3907

uning qotishmalari aviatsiya-kosmik, avtomobil, elektron va tibbiyot sanoatida keng qo‘llaniladi. Alyuminiy qotishmasi bilan taqqoslaganda, magniy qotishmadan yasalgan detal 1/3 gacha yengilroq bo‘lishi mumkin. 2024-yilda dunyo bo‘ylab xom magniy ishlab chiqarish 1,12 million tonnani tashkil etdi — bu 2023-yilga nisbatan 12% o‘sish demakdir. Magniy metalini sanoat miqyosida olishning ikkita asosiy usuli mavjud: **(1) termik kamaytirish (Pidgeon jarayoni)** va **(2) elektroliz usuli.** 1990-yillargacha elektroliz usuli jahon magniy ishlab chiqarishining 70–75% ini qamrab olgan. Hozirgi kunda Xitoyda Pidgeon jarayoni ustun bo‘lsa-da, elektroliz usuli CO_2 chiqindilari pastligi va mahsulot sifati yuqligi sababli qayta dolzarb ahamiyat kasb etmoqda.

Xomashyo va dastlabki tayyorlash

Asosiy xom ashyo manbalari

Magniy elektrolizi uchun asosiy xom ashyo sifatida quyidagi minerallar ishlatiladi:

- Karnallit — $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$: tabiiy tuz ko‘llarida uchraydigan eng keng tarqalgan xom ashyo. Elektroliz uchun suvsizlantirilgan karnallit tarkibi: 49–51% $MgCl_2$, 40–46% KCl, 6–7% NaCl.
- Bishofat — $MgCl_2 \cdot 6H_2O$: tabiiy tuzli ko‘llarda, jumladan Qo‘rg‘oshin ko‘li (Qozog‘iston), Sakkiz ko‘li va O‘lik dengizda topiladi.
- Magnezit — $MgCO_3$: dastlab kuydiriladi (MgO hosil bo‘ladi), keyin xlorlash orqali $MgCl_2$ ga aylantiriladi.
- Dengiz suvi: har litrida o‘rtacha 1,3 g Mg ioni mavjud. Dow jarayonida asosiy xom ashyo hisoblanadi.
- Dolomit — $MgCO_3 \cdot CaCO_3$: ham Pidgeon, ham elektroliz yo‘nalishida qo‘llanilishi mumkin.

Suvsizlantirish jarayoni

Elektroliz uchun zarur bo‘lgan suvsiz $MgCl_2$ ni tayyorlash ishlab chiqarish xarajatlarining taxminan 50% ini tashkil etadi. Karnallitni suvsizlantirish ikki bosqichda amalga oshiriladi:

1. Birinchi bosqich: 35–40 m uzunlikli, 3,0–3,5 m diametrli aylanuvchi nay pechlarida 120–500°C haroratda o‘tkaziladi. Suvsizlantirish darajasi 85–90%. Mahsulot tarkibida 6–8% H_2O va 2,5% gacha MgO qoladi.
2. Ikkinchi bosqich: elektrik xloratorlarda 500–560°C gacha qizdiriladi. Karnallit eriydi, Cl_2 gazi bilan ishlov beriladi. Hosil bo‘lgan suvsiz karnallit to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektrolizga yuboriladi.

Muhim. Qisman suvsizlantirilgan $MgCl_2$ (Dow usuli) elektrolizda ishlatilganda tok unumdorligi 65–70% gacha tushib qoladi va grafitdan yasalgan anodlar tez iste’mol bo‘ladi.

ELEKTROKIMYOVIY JARAYONNING MEXANIZMI.

Asosiy elektrokimyoviy reaksiyalar

ISSN 3030-3907

Magniy elektrolizi eritilgan xlorid tuzlari aralashmasida — odatda 680–720°C haroratda — amalga oshiriladi. Elektrolit tarkibida $MgCl_2$ ionlari elektrokimyoviy dissotsiatsiya natijasida hosil bo‘ladi:

$$MgCl_2 \longrightarrow Mg^{2+} + 2Cl^-$$

Doimiy tok ta‘sirida faqat Mg^{2+} ionlari katodda (manfiy elektrodda) qaytariladi, chunki uning standart elektrod potentsiali (–2,38 V) elektrolit tarkibidagi boshqa kationlar (Na^+, K^+, Ca^{2+}) dan past. Katod reaksiyasi:

$$Mg^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mg\ (l) \quad E° = -2{,}38\ V$$

Anodda xlor ionlari oksidlanib, xlor gazi ajraladi:

$$2Cl^- \longrightarrow Cl_2\uparrow + 2e^- \qquad E° = +1{,}36\ V$$

Umumiy reaksiya va nazariy minimal kuchlanish:

$$MgCl_2\ (s) \longrightarrow Mg\ (l) + Cl_2\uparrow \quad \Delta E = 3{,}74\ V$$

Katodda hosil bo‘lgan suyuq magniy (zichligi 1,57 g/sm³) elektrolit yuzasiga ko‘tariladi, chunki elektrolit aralashmasining zichligi (taxminan 1,65–1,75 g/sm³) magniynikidan yuqori. Magniy keyinchalik vakuum qoshiq yordamida kuniga bir marta yig‘iladi.

Tok unumdorligiga ta‘sir qiluvchi omillar

Tok unumdorligi (current efficiency) — real magniy miqdorining Faraday qonuniga ko‘ra nazariy miqdorga nisbati. U amalda 75–90% oralig‘ida bo‘ladi. Unumdorlikni pasaytiruvchi asosiy omillar:

- Mg^{2+} ionlarining magniy bug‘i sifatida anodga qarab migratsiyasi va unda Cl_2 bilan oksidlanishi
- Vannadagi MgO qo‘shimchalari — elektrolit sifatini yomonlashtiradi, anode yeyilishini tezlashtiradi
- Elektrolit haroratini optimal diapazonda (±2°C aniqlikda) ushlab turmaslik
- $MgCl_2$ kontsentratsiyasining ±3–20% oralig‘idan chiqib ketishi

Texnik ma‘lumot. Haroratni 30–40°C ga pasaytirish elektrolit aralashmasida tok unumdorligini taxminan 7% ga oshirishi va 1300kVt-soat/tonna energ iya tejashini ta’minlashi aniqlangan.

ASOSIY SANOAT ELEKTROLIZ JARAYONLARI.

Magniy elektrolizining to‘rtta etakchi sanoat usuli mavjud bo‘lib, ular xom ashyo tayyorlash va elektrolizyor konstruksiyasi bo‘yicha farqlanadi.

Dow dengiz suvi jarayoni (AQSh)

Dow Chemical kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan va AQShda keng qo‘llaniladigan bu usulda xom ashyo sifatida dengiz suvi ishlatiladi. Jarayon quyidagi bosqichlardan iborat:

- Dengiz suviga ohak (CaO) qo‘shiladi: $Mg^{2+} + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow + Ca^{2+}$

ISSN 3030-3907

• Cho‘kma $Mg(OH)_2$ ni xlorid kislotada eritish: $Mg(OH)_2 + 2HCl \longrightarrow MgCl_2 + 2H_2O$

• $MgCl_2 \cdot 1{,}5H_2O$ holatiga qisman suvsizlantirish (spray-drying usulida)

• To‘g‘ri burchakli, keramik qoplangan vannadagi elektroliz (710°C, sig‘imi ~10 tonna).

Dow usulining o‘ziga xos xususiyati: elektrolizyor ichida suvsizlantirish yakunlanadi, lekin bu grafitdan yasalgan anodlarni tez yeyilishiga olib keladi. Tok unumdorligi 65–70% atrofida.

VAMI jarayoni (Rossiya/SSSR)

Rossiyaning VAMI (Alyuminiy va Magniy Sanoati Ilmiy-tadqiqot Instituti) ham o‘z industrial jarayonini ishlab chiqqan. VAMI jarayonida karnallit xom ashyo sifatida ishlatiladi va suvsizlantirish fluidizatsiya qatlamidagi quritgichlarda (400 t/kun unumdorlik) va elektrik xloratorda (150–200 t/kun) amalga oshiriladi. Elektrolizyor zanjirlari ketma-ket ulanib, oqim liniyasi sifatida ishlaydi. Mahsulot — suyuq magniy — separator-kameraga yig‘iladi va u yerdan quyish bo‘limiga uzatiladi.

SANOAT USULLARINING QIYOSIY TAHLILI.

Quyida to‘rtta asosiy sanoat elektroliz usulining asosiy texnik ko‘rsatkichlari keltirilgan:

1-jadval.

Ko‘rsatkich	Dow	I.G. Farben	Norsk Hydro	VAMI
Xom ashyo	Dengiz suvi	Karnallit/Magnezit	$MgCl_2$ brin	Karnallit
$MgCl_2$ holati	Qisman suvsiz ($1{,}5H_2O$)	To‘la suvsiz	To‘la suvsiz	To‘la suvsiz
Elektroliz T, °C	700–710	680–720	660–680	680–720
Tok unumdorligi, %	65–70	75–85	80–94	75–85
Energiya sarfi, kVt·soat/kg	11–13	10–12	9,5–10,0	10–12
Anod materiali	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit
Katod materiali	Po‘lat	Po‘lat	Po‘lat	Po‘lat

ISSN 3030-3907

Diafragma	Yo‘q (maxsus vanna)	Ha	Yo‘q	Ha

Elektroliz jarayonining nazariy minimal energiya sarfi 7 kVt·soat/kg Mg ni tashkil etadi; amalda esa optimal sharoitlarda 9,5–10,0 kVt·soat/kg ga yetkazish mumkin (Norsk Hydro). Eski dizayndagi vanalar uchun bu ko‘rsatkich 10,5–13,2 kVt·soat/kg oralig‘ida bo‘ladi.

EKOLOGIK JIHATLAR VA CO_2 BALANSI.

Elektroliz usuli Pidgeon termik jarayoni bilan solishtirganda CO_2 chiqindilari bo‘yicha sezilarli afzallikka ega:

2-jadval.

Ko‘rsatkich	Elektroliz usuli	Pidgeon jarayoni
CO_2 chiqindisi, kg/kg Mg	~5,3	~25–40
Asosiy energiya manbai	Elektr energiya	Ko‘mir, koks
Xlor gazi utilizatsiyasi	Ha (qayta ishlatiladi)	Yo‘q
Sanoat chiqindilar	Shlaklarning kamayishi	Ko‘p miqdorda shlag

Anodda hosil bo‘lgan xlor gazi (Cl_2) xlorid kislotasi (HCl) ishlab chiqarishda yoki PVC sanoatida qayta ishlatiladi. Bu elektrolizni aylanma iqtisodiyot tamoyiliga mos keladigan jarayon sifatida belgilaydi.

Dengiz suvidan magniy olishning COMET (Catalyzed Organo-Metathetical) jarayoni bo‘yicha Aspen modellashtirish natijalariga ko‘ra: 1 kg Mg ishlab chiqarish uchun 35,3 kVt·soat energiya sarflanadi va 7,0 kg CO_2 chiqariladi — bu hozirgi eritilgan tuz elektrolizidan ham past.

XULOSA. Magniyni elektroliz usulida olish — texnologik jihatdan pishiq, iqtisodiy va ekologik jihatdan ustuvor sanoat jarayonidir. Asosiy xulosalar:

• Dow, I.G. Farben, Norsk Hydro va VAMI jarayonlari har biri o‘z texnik ko‘rsatkichlari bo‘yicha ma‘lum sohalarda qo‘llanishga mos. Norsk Hydro texnologiyasi eng yuqori tok unumdorligi (94% gacha) va eng past energiya sarfi (9,5–10,0 kVt·soat/kg) bilan ajralib turadi.

• Suvsiz $MgCl_2$ tayyorlash umumiy ishlab chiqarish xarajatlarining 50% ini tashkil etadi — bu sohada texnologik takomillashtirish muhim iqtisodiy samara beradi.

ISSN 3030-3907

• MgO dan bevosita magniy oluvchi yangi jarayonlar Cl_2 gazi muammosini bartaraf etadi va ekologik jihatdan yanada tozaroq alternativni taklif etadi.

• Elektroliz usuli Pidgeon jarayoniga qaraganda CO_2 chiqindilarini 5–7 marta kamaytiradi, bu esa uni barqaror rivojlanish siyosatiga mos keladigan texnologiya sifatida belgilaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Jotaki H. et al. Review on Electrolytic Processes for Magnesium Metal Production: Industrial and Innovative Processes. Materials Transactions, J-STAGE, Vol. 66(7), 2025. DOI: 10.2320/matertrans.MT-MB2024014
2. Wulandari W., Brooks G.A., Rhamdhani M.A., Monaghan B.J. Magnesium: current and alternative production routes. Chemeca 2010: Engineering at the Edge. 2010. the Edge. 2010.
2. Magnesium Electrolysis — A Monopolar Viewpoint. Norsk Hydro / Springer Link. In: Magnesium Technology 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-48099-2_14
3. Mineral-Based Magnesium Extraction Technologies: Current and Future Practices. Processes, MDPI, 2025, 13, 2945.
4. Multi-objective optimization strategy for multipolar magnesium electrolysis cell based on thermal-electric model. ScienceDirect, Journal of Energy Storage, Vol. 100, 2024. DOI: 10.1016/j.est.2024.113514
5. An Electrolytic Process Using an Ag Cathode and Vacuum Distillation for Mg Metal Production from MgO. Journal of Sustainable Metallurgy, Springer Nature, 2023. DOI: 10.1007/s40831-023-00669-2
6. Electrodeposition of Metallic Magnesium in Ionic Liquids: A Systematic Review. Minerals, MDPI, 2025, 15(10), 1021.
7. Cleaner Production Techniques in Magnesium Alloy Recycling. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 1026, 2025.
8. Kipouros G.J., Sadoway D.R. Advances in Molten Salt Chemistry, Vol. 6, 1987.
9. Evans J.W. The evolution of technology for light metals over the last 50 years: Al, Mg, and Li. JOM, 2007, 59(2), 30–38.

ISSN 3030-3907