https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

Mahmudov G‘.B.
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

SIANLASH JARAYONIDA IONSELEKTIV ELEKTRODI USULI YORDAMIDA SIAN KONSENTRATSIYASINI O‘LCHASH ANIQLIGINI OSHIRISH

Annotatsiya: Ushbu maqolada sian ionlarining konsentratsiyasini o‘lchashda ionselektiv elektrodlardan (ISE) foydalanishning ilmiy-metodik asoslari, metrologik jihatidan o‘lchash aniqligi va sanoatdagi qo‘llanilishi keng tahlil etilgan. Nodir metallarni sianlash jarayonining umumiy fizik-kimyoviy xususiyatlari, sinalash jarayonida ISE usulining afzalliklari o‘lchash aniqligini oshirishga qaratilgan texnik va algoritmik yechimlar, shuningdek o‘lchash tizimining strukturaviy sxemalari va uning tavsifi yoritilgan. Bundan tashqari, ISE asosidagi o‘lchash tizimlarini sun’iy intellekt bilan bog‘lash orqali aniqlikni oshirish, ishonchlilikni ta’minlash hamda avtomatlashtirilgan monitoring qilish imkoniyatlarini yaratish istiqbollari ko‘rib chiqilgan.

Tayanch so‘zlar: sian ionlari, ionselektiv elektrod, metrologik aniqlik, sianlash jarayoni, kalibrlash, signallarni filtrlash, intellektual tizim, real vaqt monitoring, membrana selektivligi, oltin qazib olish, fizik-kimyoviy tahlil, mikroprotsessorli tizim, sun’iy intellekt.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦИАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИОНСЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДА В ПРОЦЕССЕ ЦИАНИРОВАНИЕ

Аннотация: В статье представлен комплексный анализ научных и методических основ применения ионселективных электродов (ИСЭ) для

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

измерения концентрации цианид-ионов, их метрологической точности и промышленного применения. Обсуждаются общие физико-химические свойства процесса цианирования редких металлов, преимущества метода ИСЭ в процессе анализа, технические и алгоритмические решения, направленные на повышение точности измерений, а также структурные схемы измерительной системы и её описание. Кроме того, рассматриваются перспективы повышения точности, обеспечения надежности и создания возможностей автоматизированного контроля путем подключения измерительных систем на основе ИСЭ к искусственному интеллекту.

Ключевые слова: цианид ионы, ионселективный электрод, метрологическая точность, процесс цианирование, калибровка, фильтрация сигналов, интеллектуальная система, мониторинг в реальном времени, селективность мембран, извлечение золота, физико-химический анализ, микропроцессорная система, искусственный интеллект.

INCREASING THE ACCURACY OF CYANINE CONCENTRATION MEASUREMENT USING THE ION-SELECTIVE ELECTRODE METHOD IN THE CYANIDATION PROCESS

Abstract: The article presents a comprehensive analysis of the scientific and methodological foundations of the use of ion-selective electrodes (ISE) for measuring the concentration of cyanide ions, their metrological accuracy and industrial application. The general physicochemical properties of the rare metal cyanidation process, the advantages of the ISE method in the analysis process, technical and algorithmic solutions aimed at improving the accuracy of measurements, as well as structural diagrams of the measuring system and its description are discussed. In addition, the prospects for improving accuracy, ensuring reliability and creating automated control capabilities by connecting ISE-based measuring systems to artificial intelligence are considered.

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

Keywords: cyanide ions, ion-selective electrode, metrological accuracy, cyanidation process, calibration, signal filtering, intelligent system, real-time monitoring, membrane selectivity, gold extraction, physicochemical analysis, microprocessor system, artificial intelligence.

Kirish

Jahonda so‘nggi vaqtlarda oltin tarkibli madanlardan oltinni ajratib olish jarayonlaridan biri sorbsiyali sianlash usuli bilan ishlab chiqarish jarayonlarini modellashtirish va boshqarish texnologiyalarida tayyor mahsulotlarning sifat ko‘rsatkichlari bo‘yicha avtomatik va avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarini takomillashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Shuning uchun sorbsiyali sianlash jarayonining energiya va resurs tejamkor, optimal parametrli boshqarish tizimlarini ishlab chiqish muhim vazifalardan biri hisoblanadi. Gidrometalurgik jarayonlarida zaharli kimyoviy reangentlar va chiqindilarni atrof-muhitga zarar yetkazayotganligi, madan konsentratsiyalariga ishlov berish usullarini xavfsizroq qo‘llash eng muhim muammolardan biri hisoblanadi. Ko‘plab davlatlarda madanlardan oltinni ajratib olish uchun eritma konsentratsiyalari sifatida sian eritmasi (NaCN) ishlatiladi. Lekin bu jarayon ekologik nuqtayi nazardan juda ham xavfli hisoblanadi. Chunki yuqori darajali zaharli reagentlar ishlatiladi. Bu esa atrof – muhidga va ishchilarga xavf tug‘diradi.

Zamonaviy sanoat ishlab chiqarish korxonalarida texnologik jarayonlarning avtomatlashtirilgan nazorat qilish va rostlash tizimlarini ishlab chiqib, ularni joriy qilish tadbirlari amalga oshirilib kelmoqda. Bu esa bevosita ishlab chiqarish unumdorligi, tayyor mahsulot sifati hamda tannarxiga katta ta’sir o‘tkazadi [1].

Yechiladigan muammo va masalaning qo‘yilishi.

Oltin ishlab chiqarish fabrikalarida sorbsiyali sianlash usulida oltin tanlab eritish jarayoni asosiy jarayonlaridan biri hisoblanadi. Bugungi kunda sorbsiyali sianlash usulida oltin ajratib olishda aktiv ko‘mir yoki ion almashinuvchi smolalar yordamidagi texnologiyalar Rossiya Federatsiyasi hamda MDH Respublikalarida

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

jumladan: Rossiyada: Kuran, Keramin, Lebidin, Severoenisey; O‘zbekistonda: Muruntau (NKMK: GMZ1, GMZ2, GMZ3, GMZ4, GMZ5, GMZ6 va GMZ7), Angren va Marjonbuloq; Qizg‘izistonda: Makmal; Armeniyada: Ararat korxonalarida amalda qo‘llanilmoqda [1-2].

Kichik o‘lchamli oltin zarrachalarini ajratib olishning asosiy usullaridan biri bu sianlash jarayoni hisoblanadi. Sianlash jarayonining asosiy mohiyati – nodir metallarni ishqoriy metallari bilan hosil qilgan tuzlar va kislorod yordamida eritishdan iborat. Odatda, oltin tarkibli madanlarni sianlashdan oldin 80 – 90 % kattalikkacha 0,074 mm o‘lchamda yanchiladi. Sianlash jarayonida oltin kislorod yordamida oksidlanadi va eritmaga kompleks anion ko‘rinishda o‘tadi. Jarayonning umumiy kimyoviy ko‘rinishi quyidagi 2 ta ketma-ket reaksiya orqali boradi [3]:

$$2Me + 4CN^- + O_2 + 2H_2O = 2\ Me(CN)_2^- + 2OH^- + H_2O_2 \quad (1)$$

$$2Me + 4CN^- + H_2O_2 = 2\ Me(CN)_2^- + 2OH^- \quad (2)$$

Oltin bilan ko‘pincha birinchi reaksiya amalga oshadi, ya’ni:

$$2Au + 4CN^- + O_2 + 2H_2O = 2\ Au\ (CN)_2^- + 2OH^- + H_2O_2 \quad (3)$$

Sianlash jarayoni elektrokimyoviy jarayon hisoblanib, oltinning erishiga asosiy sabab uning kompleks ion $Au(CN)_2$ ni hosil qilishidadir. Oltin juda yuqori erkin energiyaga ega bo‘lib, u NaCN ishtirokida kompleks ion hosil qilishini (3) reaksiya tenglamasidan ko‘rish mumkin. Oltin kompleksi sian ionlarining metall yuzasida diffuziyasi sababli hosil bo‘ladi. Ular suv molekulalarini siqib chiqarib metall bilan ta’sirlashadi va natijada oltin anion kompleks hosil bo‘ladi va oltin eritmaga o‘tadi [1]:

$$Au + 2CN^- = Au(CN)^{2-} + e \quad (4)$$

Shunday qilib, oltin ionining yo‘qotilishi valent elektronning erkinlashishi oltinning elektronlarini berilishi bilan izohlanib, u mikroelementda galvanik tok

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

hosil qiladi va anodga aylanadi. Katod bo‘limida kislorodning qaytarilishi kuzatiladi va natijada ma’lum miqdorda vodorod pereoksid hosil bo‘ladi [1-2].

$$O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH^-, \varphi = +0,4B \quad (5)$$

$$O_2 + 2H_2O + 2e = H_2O_2 + 2OH^-, \varphi = -0,15\,B \quad (6)$$

Yuqorida keltirilgan (5-6) reaksiyalar orasida sekin boradigani bu kislorodni qaytarilishi hisoblanadi. Ushbu jarayonning mohiyati shundan iboratki, molekula holidagi kislorod parchalanib atom holiga o‘tadi. Sianlash jarayonida NaCN ning 0,02-0,05 % li eritmasi ishlatiladi. Oltin kompleks holda erib eritmaga o‘tadi. Yuqorida keltirilgan moddalarning kamayishi, jarayonni sekinlashishiga olib keladi. Kislorod va sian konsentratsiyasini oshib ketishi salbiy natija beradi, chunki kislorod va NaCN eritma tarkibidagi qo‘shimcha metallarni eritishga olib keladi va bu esa oltin ajratib olishni qiyinlashtiradi. Sianlash jarayonini olib borish harorati 20-45 ^{0}C da olib boriladi. Bunda erigan kislorodning diffuziyasining ishonchli borishini ta’minlash kerak. Eng kerakli sharoit uchun NaCN va O_2 larning diffuziya tezligi barobar bo‘lishi kerak [4].

NaCN konsentratsiyasini o‘ta ko‘payishi, erish jarayonini oshirmaydi. Tajribalar shuni ko‘rsatadiki, kislorodning portsial bosimi 0,21 atm., bo‘lganda NaCN ning chegaralangan konsentratsiyasi 0,02-0,1 % ga teng bo‘lishi kerak. Bu kattaliklar oltin saralash fabrika va zavodlarining ko‘rsatkichlariga mos keladi. Agar NaCN ning kerakli konsentratsiyasini ushlash oson bo‘lsa, kislorod uchun bu ish murakkab sanaladi. Sianning optimal konsentratsiyasini tanlashda eritma tarkibidagi kislorod konsentratsiyasi hisobga olinadi. Reagentlarning konsentratsiyalarini o‘lchashda elektrodlardan foydalanishning statsionar sharoitlari uchun ionometriyaning nazariy asoslari ancha batafsil ishlab chiqilgan bo‘lib [6-7], gidrodinamik nazorat qilinadigan sharoitlarda potensiometrik aniqlash nazariyasi 1980-yillarga kelib jadal rivojlana boshlagan.

Zamonaviy sanoat ishlab chiqarish jarayonlarida kimyoviy reaksiyalarni aniq va tezkor nazorat qilish texnologik xavfsizlik hamda mahsulot sifati uchun

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

muhim ahamiyatga ega. Ayniqsa, nodir metallar, jumladan oltin va kumushni rudalardan ajratib olishda keng qo‘llaniladigan sianlash jarayoni samaradorligi ko‘p jihatdan NaCN konsentratsiyasining to‘g‘ri belgilanishiga bog‘liq hisoblanadi.

Sianlash jarayonida sian ionlari metallarning eruvchan komplekslarini hosil qilib, ularni rudadan ajratib olishga imkon yaratadi. Jarayon samaradorligi va ekologik xavfsizligi sianning hajmiy sarfini boshqarishga tayanadi. Sian konsentratsiyasining ortiqcha bo‘lishi atrof-muhit uchun xavfli chiqindilarga olib keladi, yetarli darajada bo‘lmasa, texnologik jarayon to‘liq rejim amalga oshmaydi. Shu sababli, NaCN konsentratsiyasini yuqori aniqlikda va real vaqt rejimida o‘lchash dolzarb vazifalardan biri sanaladi. NaCN konsentratsiyasini o‘lchashning an’anaviy usullari – titrimetrik analiz, kolorimetriya va spektrofotometriya – odatda laboratoriya sharoitida qo‘llaniladi va ko‘proq vaqt talab etadi. Ushbu usullarni ishlab chiqarish jarayonining o‘zida to‘g‘ridan-to‘g‘ri amalga oshirishning imkoniyati yo‘q. Shuning uchun, ularning sezuvchanligi va qayta takrorlanuvchanligi ko‘pincha talab darajasida bo‘lmaydi. Ushbu muammoning zamonaviy yechimlaridan biri – ionselektiv elektrodlarga (ISE) asoslangan avtomatlashtirilgan o‘lchash tizimlaridan foydalanish hisoblanadi. ISE texnologiyasi orqali eritmadagi ma’lum ionlarga sezgir elektrokimyoviy datchiklar yordamida tezkor va aniqligi yuqori tahlillarni amalga oshirish mumkin.

ISE eritmadagi ma’lum bir ionga sezgirlikni ko‘rsatadigan maxsus elektrokimyoviy sezgir element hisoblanadi. Ular ion selektiv membranasi, ichki elektrod, ichki bufer eritmasi va tashqi korpusdan iborat bo‘lib, turli analitik o‘lchashlarda keng qo‘llaniladi. NaCN uchun ishlab chiqilgan ISE lar ushbu ionga nisbatan yuqori selektivlik xususiyatiga ega bo‘lib, oltin ajratish texnologiyalarida muhim ahamiyat kasb etadi.

ISE larining ishlash prinsipi Nernst tenglamasiga [8] asoslangan bo‘lib, elektrod potensiali eritmadagi ionning konsentratsiyasiga proporsional bo‘ladi:

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} ln(a_{CN^-} + \sum K_i a_i) \quad (7)$$

bu yerda, K_i – interferent ionlar ta'sirini ko'rsatuvchi koeffitsiyent, E – o'lchanayotgan potensial, E^0 – standart potensial, R – gaz doimiysi, T – mutlaq harorat (Kelvin), n – ion zaryadi (CN^- uchun n=1), F – Faradey doimiysi, a_{CN} – sian ionlarining konsentratsiyasi bilan ifodalanadi.

Mazkur tenglama asosida ISE potensiali logaritmik ko'rinishda o'zgaradi. Ushbu xususiyat tahlilning sezuvchanligini oshiradi va konsentratsiya o'zgarishlarini aniq qayd etish imkonini beradi. ISE sian ionlariga optimal selektivlikni faqatgina pH 11–13 oralig'ida namoyon qiladi.

Eksperiment va olingan natijalarning tahlili.

Tahlil qilinayotgan pulpa tarkibidagi metallning xususiyati va uning konsentratsiyasini aniqlashda muhitning xususiyatlarga bog'liq bo'lgan yondashuv asosida amalga oshiriladi. Ushbu sohaning muammolaridan biri sianli eritmalar $[Au(CN)_2]^-$ tarkibidagi oltin konsentratsiyasini aniqlashning potensiometrik usulini ishlab chiqish hisoblanadi [9]. Tahlil qilinayotgn NaCN yirik gidrofobli kationlar bilan ionli birikmalarni hosil qilib, organik erituvchilar yordamida oson ajratib olinadi.

ISE ning metrologik xarakteristikalarini tadqiq qilish uchun quyidagi uskunalardan foydalanildi:

– I-160M markali laboratoriya ionomerining asosiy yo'l qo'yiladigan xatoligi ±1mV va ishchi diapazoni -3000...+3000 mV ga teng;

– Biosan MSH-300 harorat rostlagichiga ega elektromagnitli aralashtirgich;

– elektrodli o'lchash yacheykasi 50 ml;

– EVL-1,3 M markali taqqoslash elektrodi.

Pulpa tarkibini tahlil qilishdan oldin ISE kuchli sianli oltin tarkibli eritmalarda uzoq vaqt saqlab turildi. Tadqiqotlarni o'tkazish uchun 1-jadvalda keltirilgan xususiyatlarga ega bo'lgan oltin tarkibli NaCN lardan foydalanildi.

Standart eritmalarning xususiyatlari

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

1-jadval

№	Konsentratsiya Au, mg/dm^3	Konsentratsiya NaCN,%	Konsentratsiya NaOH,%
1	2	0,12	0,85
2	11,6		
3	106,3		
4	977		

Kimyoviy datchiklarning sezgirligini aniqlovchi elektrod funksiyasining qiyaliligi [10] EYuK qiymatlari bilan aniqlanayotgan moddaning konsentratsiyasi logarifmi orasidagi bog‘lanishni ifodalovchi parametr bo‘lib, u son jihatdan haroratga bog‘liq bo‘lgan Nernstning burchak koeffitsiyentiga teng. 25 °C haroratda va aniqlangan ionning faolligi o‘n marta o‘zgarganda, u bir zaryadli ionlar uchun 59,16 mV va ikki zaryadli ionlar uchun 29,58 mV ga teng. Biroq, odatda qiyalik burchagi koeffitsiyenti nazariy qiymatdan pastroq bo‘ladi. Bunga xalaqit beruvchi aralashmalarning mavjudligi va membranasidan yuvib chiqarilishi sabab bo‘ladi.

ISE membranasining tarkibidagi moddalar xususiyatiga ko‘ra, quyidagi turlarga bo‘linadi [6-8]:

– qattiq membranali elektrodlar;
– ion almashinuvchanlikka asoslangan suyuqlikli elektrodlar;
– gazli va fermentli elektrodlar;
– ion selektiv maydonli tranzistorlari;
– polivinilxlorid membranali elektrodlar;

PVX membranalar birinchi marta Mangoliya olimi A. Shatki tomonidan taklif qilingan. Bunday membranalarni ishlab chiqish usuli J. Mudi, R. Oke va D. Tomaslar tomonidan taklif etilgan va keng qo‘llanilgan [7].

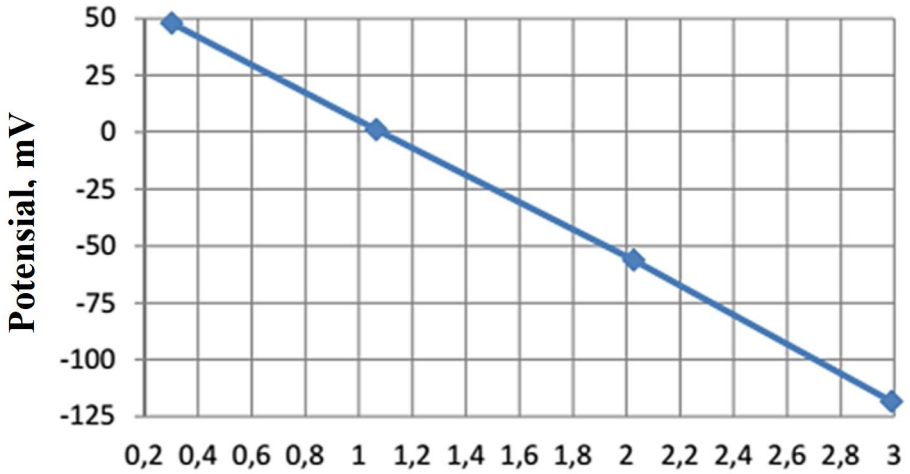
PVX-elektrodning statik xarakteristikasini olish natijalarini qayta ishlash

2-jadval

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

Parametr	Konsentratsiya, mg/dm³			
	2	11,6	106,3	977
O‘lchashlar soni	6	6	6	6
Matematik kutilma, mV	47,95	1,15	–56,20	–118,38
O‘rtacha kvadratik og‘ishi, mV	1,12	1,63	1,16	0,63
0,95 ehtimollik uchun ishonchli qiymat oralig‘i	2,874	4,191	2,984	1,629

Nazariy qiymatdan yuqori bo‘lgan qiyalik burchak koeffitsiyentlari juda kam hollarda kuzatiladi. Ular shuni ko‘rsatadiki, asosiy jarayondan tashqari, bir qator qo‘shimcha elektroddagi jarayonlari ham sodir bo‘ladi. Bu hodisani kumush simdan tok olish usulini qo‘llab, unga membrana qoplash paytida kuzatgan. O‘lchash ma’lumotlarini statistik qayta ishlash natijalari 2-jadvalda keltirilgan. Statik xarakteristikaning grafik ko‘rinishi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. Normal sharoitda ISE ning statik tavsifi

Elektrodning o‘rtacha qiyaligi 56±2 mV/lgC ni tashkil etdi. Tadqiqot natijalari quyidagilarni ko‘rsatdi:

– yaratilgan ISE ning statik tavsifi koordinatalarda chiziqli bo‘ladi:

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

$$E=f(lgC([\mathrm{Au}(\mathrm{CN})_2]^-) \quad (8)$$

- o‘rtacha kvadratik og‘ish 2 mV dan oshmaydi;
- elektrod oltin konsentratsiyasining o‘zgarishiga yetarlicha sezgir bo‘ladi.

Potensiallarni o‘rnatish vaqti yoki javob berish vaqti [6] har qanday o‘lchash vositasining ishlashining dinamik xarakteristikalaridan biri hisoblanadi. Bu tushuncha elektrodning eritmaga botirilgan paytidan boshlab, ko‘rsatkichlar barqarorlashgan paytgacha bo‘lgan vaqt oralig‘ini anglatadi. Ushbu vaqt oralig‘ida potensial muvozanat yoki turg‘un qiymatga erishadi.

ISE potensialining siljishi elektrod yuzasi tuzilishidagi o‘zgarishlar va ion almashinuvchi ionlarning tekshirilayotgan eritmada erishi bilan bog‘liq hodisa hisoblanadi. Adabiyotlarda keltirilgan potensial siljish qiymatlari sezilarli darajada farqlanadi va ba’zi ma’lumotlarga ko‘ra, ushbu ko‘rsatkich sutkasiga 2-4 mV gacha yetishi mumkin. Eritmaning konsentratsiyasi va harorati o‘zgarmas bo‘lgan sharoitda, potensialning o‘zgarishi elektrod tizimining vaqt davomida potensial o‘zgarishini o‘lchash orqali tadqiq qilindi [11].

O‘lchash asbobining ishlashiga quyidagi omilning ta’sirini bartaraf etish maqsadida, elektrodli o‘lchash tizimi ko‘rsatkichlariga tuzatish kirituvchi algoritm ishlab chiqildi. Algoritm quyidagi amallar ketma-ketligi bilan ifodalanishi mumkin.

1. O‘lchash tizimini ikki nuqta bo‘yicha kalibrlash ishga tushiriladi, bunda birinchi kalibrlash eritmasi uchun potensial $E_1(0)$ va ikkinchi kalibrlash eritmasi uchun potensial E_2 (0) mV da qayd etiladi, shuningdek kalibrlashni o‘tkazish vaqti eslab qolinadi.

2. O‘lchashlarning birinchi bosqichida siljish bo‘yicha tuzatish kiritilmaydi.

3. *t* vaqtdan keyin o‘lchash tizimini qayta kalibrlash amalga oshiriladi, shuningdek ikkita kalibrlash eritmalari $E_1(t)$ va $E_2(t)$ uchun potensial qiymatlari qayd etiladi va kalibrlash vaqti *t* sekundlarda qayd etiladi.

4. Ikkita kalibrlash o‘rtasidagi potensial siljishi hisoblanadi:

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

$$\Delta E_1 = E_1(t) - E_1(0)$$
$$\Delta E_2 = E_2(t) - E_2(0) \quad (8)$$

5. Siljishning o‘rtacha qiymati hisoblanadi va sekundga teng bo‘lgan vaqt birligiga keltiriladi:

$$D = (\Delta E_1 + \Delta E_2)/(t_2), \quad (9)$$

bu yerda D – mV/s da ifodalangan tuzatish qiymati.

6. Oxirgi bosqichda o‘lchangan E_{tek} potensialining qiymatiga oxirgi kalibrlashdan keyin o‘tgan t_{tek} vaqtga ko‘paytirilgan D tuzatish qiymatini qo‘shish yo‘li bilan tuzatish kiritiladi

$$E_x = E_{Tek} + D\ t_{Tek} \quad (10)$$

bu yerda E_x – tuzatish kiritishni hisobga olgan holda o‘lchash tizimi potensialining qiymati.

Izopotensial nuqtaning haqiqiy koordinatalarini aniqlash uchun eritmadagi elektrod potensialini ikki temperaturada o‘lchash kifoya. Izopotensial nuqtaning koordinatalarini hisoblash quyidagi formulalar bo‘yicha amalga oshirildi:

$$LgC_u = \frac{E_{t1} - E_{t2} + S_{t2}\ LgC_{t2} - S_{t1}\ LgC_{t1}}{S_{t2} - S_{t1}} \quad (11)$$

$$E_u = S_{t1}\ (LgC_u - LgC_{t2}) + E_{t1} \quad (12)$$

bu yerda E_{t1} va E_{t2} – elektrodning t_1 va t_2 haroratlardagi potensiallari, S_{t1} va S_{t2} – tegishli haroratdagi qiyaligi, LgC_{t1} va LgC_{t2} – tegishli haroratda o‘lchangan eritmalar konsentratsiyasining o‘nli logarifmlari, E va lgC – izopotensial nuqtaning koordinatalari.

Birinchi datchik uchun izopotensial nuqtaning qiymatlari:

$$E_u = -120 мВ \lg C_u = 3,07;$$

Ikkinchi datchik uchun

$$E_u = -143 мВ \lg C_u = 3,7$$

Izopotensial nuqtaning koordinatalaridan foydalanib, elektrodning E_t potensialining berilgan t harorati uchun LgC ga bog‘liqligini quyidagicha ifodalash mumkin:

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

$$E_t = E_u \mp S_t(LgC_t - \lg C_u). \quad (13)$$

Amaliy hisoblashlar uchun mazkur tenglamadan quyidagi ko‘rinishda foydalanish maqsadga muvofiq:

$$E_t = E_u - (E_0 + 0{,}198\ (273{,}15 + t))(LgC - \lg C_u). \quad (14)$$

Mos ravishda eritmaning LgC qiymati t temperaturada quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$LgC_t = \lg C_u + \frac{(E_t - E_u)}{S_t}, \quad (15)$$

bu yerda S_t – berilgan harorat uchun elektrod funksiyasining qiyaligi; LgC_t – eritma konsentratsiyasining berilgan haroratdagi o‘nli logarifmining qiymati.

ISE larga asoslangan o‘lchash tizimlarining asosiy ustunligi ularning sezuvchanligi va aniq o‘lchash qobiliyati sanaladi. Biroq real sharoitda ISE ning o‘lchash aniqligi membrana sifati, eritma tarkibi, signalni qayta ishlash texnologiyasi, kalibrlash aniqligi va interferensiyaga qarshi himoya ko‘plab omillarga bog‘liq bo‘ladi.

ISE dan olingan signal odatda kuchlanishi pastroq va shovqin ta’siri ostida bo‘ladi. Uni aniqlik bilan unifikatsiyalash va raqamli signalga o‘zgartirish uchun Kalman va boshqa filtrlar, ARO‘ (Analog raqamli o‘zgartirgich) lar qo‘llaniladi. Bundan tashqari oraliq kuchytirgich sxemalari orqali birlamchi o‘zgartirgichdan olingan mV ko‘rinishidagi signallarni V ko‘rinishida kuchaytiriladi.

ISE larga asoslangan tizimlarni zamonaviy mikroprotsessor va sun’iy intellekt algoritmlari bilan bog‘lash orqali real vaqtli, aniq va mustahkam o‘lchash tizimlari yaratish mumkin. Ushbu yondashuv raqamli sanoat (Industry 4.0) talablari bilan uyg‘un bo‘lib, sianlash jarayonidagi sian konsentratsiyasini avtomatik nazorat qilish va rostlashni ta’minlaydi [4-5].

Olingan natijalarning qo‘llanilish sohalari.

Zamonaviy mikrokontrollerlar ISE datchiklaridan olingan signalni o‘qish, raqamli signalga o‘zgartirish va qayta ishlash uchun asosiy vosita bo‘lib xizmat qiladi. Eng ko‘p qo‘llaniladigan mikrokontrollerlar sifatida STM32 – kuchli ARO‘,

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

DMA va UART interfeyslariga ega, ESP32 – Wi-Fi va Bluetooth modullari bilan jihozlangan, bulutli texnologiyaga ulanish imkoniga ega, Arduino UNO / Mega – o‘rganish uchun qulay, past energiya sarfi, Raspberry Pi – yuqori darajadagi hisoblash quvvatiga ega bo‘lgan mikrosxemalarni olish mumkin [12].

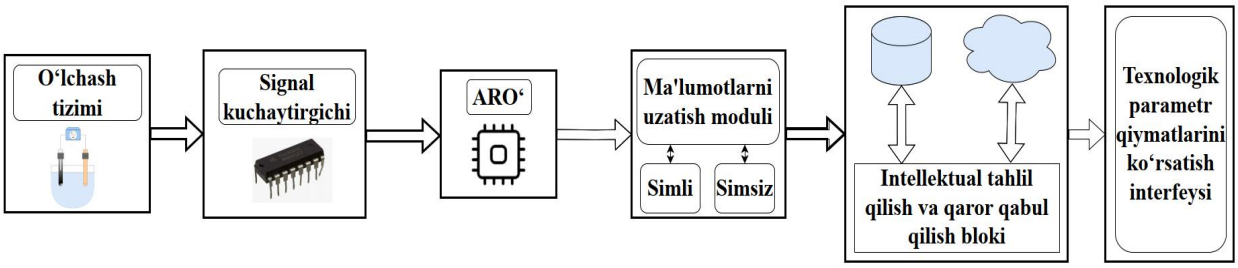
O‘lchash aniqligini oshirish va natijalarni tahlil qilish uchun ISE tizimiga sun’iy intellekt (SI) algoritmlari bog‘lash orqali yuqori samaradorlikka erishish mumkin. Bunda SI ning sun’iy neyron tarmoqlari [13] – oldingi natijalar asosida yetarli aniqlikda bashorat qilish uchun, noravshan mantiq [14-15] – noravshan signallardan tushunarli xulosa chiqarish uchun, Decision Tree va Random Forest [16] – signalni belgilariga ko‘ra sinflash hamda diagnostika qilish uchun eng samarali vositalarida sanaladi.

SI algoritmlarining dasturiy ta’minotlarini Python, MATLAB yoki LabVIEW muhitida ishlab chiqilib, mikrokontroller bilan bog‘langan kompyuter orqali sinxronlash mumkin. Natijada, o‘lchash kanallaridagi signal shovqini kamayadi, o‘lchash natijalarini avtomatik tarzda baholash va tahlil qilish mumkin bo‘ladi, avtomatik ravishda signallash tizimlari joriy etiladi. Bu esa bevosita texnologik jarayon parametrlarni sarfini hamda jarayon stabil optimal rejimda borishini ta’minlaydi.

Intellektual tizimlarda o‘lchash natijalarini masofadan monitoring qilish imkoniyati ham mavjud. Buning uchun bugungi kunda rivojlanib borayotgan LoRa – uzoq masofali va energiya tejamkor uzatish (10 km gacha), Wi-Fi / Ethernet – tarmoq orqali real vaqt rejimida ma’lumotlarni uzatish, Bluetooth / BLE — mobil qurilmalarga ulanish va GSM / GPRS (SIM800L) — mobil aloqa orqali uzatish uchun texnologiyalardan foydalanish maqsadga muvofiq.

ISE asosidagi intellektual o‘lchash tizimining strukturaviy sxemasi quyidagi ko‘rinishda keltirildi.

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026



1-rasm. ISE asosidagi intellektual o‘lchash tizimining strukturaviy sxemasi

ISE larga asoslangan sian konsentratsiyasini o‘lchash tizimi samaradorligini baholash uchun laboratoriya va yarim sanoat sharoitida tajribalar o‘tkazildi. Tadqiqotlar sian ionlarining turli konsentratsiyadagi eritmalardagi elektroddan berilyotgan signalini, interferensiya omillari, kalibrlash chiziqlari va sun’iy intellekt yordamida aniqlikni oshirish imkoniyatlarini qamrab oldi.

Eksperimental sinov tajribasida Ag_2S asosidagi sian konsentratsiyasini sezuvchi ISE, Ag/AgCl (3M KCl eritmasida) taqqoslovchi elektrod, pulpadagi pH qiymati 11,5–12,8 oralig‘ida NaOH standart buffer eritmasi, $1\cdot10^{-6}$, $1\cdot10^{-5}$, $1\cdot10^{-4}$, $1\cdot10^{-3}$, $1\cdot10^{-2}$ mol/l konsentratsiyali kalibrlash eritmalari, 12-bitli STM32 mikrokontrollerli ARO‘, Kalman filtrlari [17], Python muhitida yaratilgan 3 qatlamli sun’iy neyron tarmoqlari qo‘llanilgan.

Tajriba raqami	Konsentratsiya (mol/l)	O‘lchangan potensial (mV)	Aniqlik (%)
1	$1\cdot10^{-2}$	-93.4	±1.8
2	$1\cdot10^{-3}$	-117.6	±2.0
3	$1\cdot10^{-4}$	-141.1	±2.2
4	$1\cdot10^{-5}$	-164.7	±3.8
5	$1\cdot10^{-6}$	-188.2	±5.1

Yuqori konsentratsiyalarda ($\geq10^{-4}$ mol/l) ISE juda barqaror signal bergan. Past konsentratsiyalarda esa shovqin ko‘paygan, ammo raqamli filtrlash yordamida foydali signal ajratib olingan. Taqqoslovchi ionlar ta’siri: Zn^{2+} (10^{-3} mol/l) – ±1,2 mV, Cu^{2+} (10^{-3} mol/l) – ±1,7 mV, SO_4^{2-} va NO_3^- – deyarli nol interferensiya, HCN (gaz holati) – signalga ta’sir qilmagan (pH 12 dan yuqori bo‘lgani uchun) ko‘rib chiqildi.

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

Xulosa

ISE tizimi STM32 orqali jihozlangach, o‘lchash natijalari grafik interfeys orqali ko‘rsatildi. Grafik interfeysning asosiy funksiyalari sifatida real vaqt konsentratsiya grafigini ko‘rsatish, pH va haroratni real vaqt rejimida monitoring qilish, “Konsentratsiyaning chegaraviy qiymatlarida” signallash, Excel/PDF hisobotlarni yaratish va nusxalab berish imkoniyatlariga erishildi.

ISE larga asoslangan sian ionlarini o‘lchash tizimi – zamonaviy metrologik, texnologik va ekologik talablarga javob beruvchi, yuqori aniqlikli va tezkor o‘lchash usuli sifatida sanoat jarayonlarida o‘zining dolzarbligini isbotlamoqda. Ayniqsa, oltin va boshqa qimmatbaho metallarni sianlash texnologiyasida, bu usulning qo‘llanilishi samaradorlikni oshirish bilan birga, xavfsizlikni ham ta’minlaydi [18]. Raqamli signalni qayta ishlash (Kalman, Moving Average) orqali signal shovqinlari sezilarli darajada kamaytirishga erishildi. SI texnologiyalari yordamida o‘lchash aniqligi o‘rtacha 18 % ga oshirildi, bu esa tizimning adaptivligini va o‘z-o‘zini optimallashtirish imkoniyatini yaratdi. Tizimni mikrokontrollerlar (STM32, ESP32) va LoRa/Wi-Fi [19] orqali intellektual monitoring qilish tizimlariga bog‘lash orqali, real vaqt rejimida sianlash jarayonidagi sian konsentratsiyasini uzluksiz nazorat qilish imkoniyati paydo bo‘ldi.

Kelajakda quyidagi yo‘nalishlarda tadqiqot va amaliy ishlanmalarni davom ettirish uchun ko‘p ionli selektiv tizimlarni ishlab chiqish (sian bilan birga rux, mis, nitratlar aniqlanishi), SI bilan o‘z-o‘zini o‘rganuvchi kalibrlash algoritmlari ishlab chiqish, bulutli texnologiyalarga asoslangan monitoring tizimlari (IoT) [19] orqali onlayn nazorat qilish, portativ ISE qurilmalarini ishlab chiqish va konchilik sanoatidagi boyitish jarayonlarida bevosita qo‘llash maqsadga muvofiq. Mazkur maqolada aynan sianlash jarayonida ISE usulini qo‘llashning ilmiy asoslari, metrologik talablari, signalni tahlil qilish algoritmlari va sun’iy intellekt bilan integratsiyalash imkoniyatlari keng yoritiladi.

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Петухов О.Ф., Санакулов Қ.С., Хасанов А.С., Мустокимов О.М. “Окислително–востоновительние процесси в металлургии”. Ташкент, “Истиқлол нури” 2013 г.

2. de Andrade Lima, L.R.P., Hodouin, D., and Bax, A. (2002). Comparison of empirical and phenomenological approaches to the analysis of gold cyanidation plant performance. In: Laplante, A. (ed.), Proceedings of the International Symposium on Gold Recovery. CIM Special Volume, no. 51, pp. 45-55.

3. Шумилова В.Л. “Подготовка пирит – арсенопиритового концентрата к выщелачиванию золота на основе использования полиреагентных комплексов” Transbaical State University, “Горне науки и технологии” / “Mining science and technology”, 2016, № 1, pp. 3–11.

4. О.А. Жумаев, А.А. Ахматов, Г.Б. Махмудов. «Моделирование процессы оптимального смешения цианистых растворов с использованием интеллектуальных систем измерения на основе нечеткой логики». Контроль и управления химической технологии. 1- 2/2018.

5. Jumaev O. et al. Development of a digital signal processing model using a frequency synthesizer and synthesis of quadrature conversion circuits //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 419. – C. 01003.

6. Volkov V. I., Zaytsev I. A. Ionselektiv elektrodlari va membranali sensorlar. – Moskva: Kimyo nashriyoti, 2015. – 304 b.

7. Nemtsov A. A., Menshikov P. A. Elektroanalitik kimyoning nazariy asoslari. – Moskva: Oliy maktab, 2012. – 387 b.

8. Mahmudov, G., & Qalandarov, A. F. (2025). Ion selektiv elektrodlari yordamida NaCN konsentratsiyasini o‘lchash tizimini tadqiq QILISH. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, *6*(1), 5-11.

9. Velikanova T. I., Saxarov K. Yu. Sianidlar tahlilida ionselektiv elektrodlardan foydalanish // Metallurgiya va ekologiya jurnali. – 2020. – № 3. – B. 55–62.

https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble
Qabul qilingan sana: 07.12.2025
Nashr etilgan sana: 30.01.2026

10. Pavlov D. I. Sianidga sezgir ISE yordamida gidrometallurgiyada tahliliy qo‘llanma // *Elektroanalitik kimyo jurnali*. – 2019. – T. 837. – B. 145–151.

11. Jumaev, O., Karpovich, D., Ismoilov, M., Makhmudov, G., & Sayfulin, R. (2025). Algorithms to improve system reliability. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 627, p. 04008). EDP Sciences.

12. Jumaev, O. A., Mahmudov, G. B., Rashidov, G. H., & Sodiqov, B. Q. (2023, September). Microcontroller device for increasing the accuracy of PID regulators. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2872, No. 1, p. 120051). AIP Publishing LLC.

13. Husayn A. va boshq. Kimyo sanoatida jarayonlarni boshqarishda sun’iy neyron tarmoqlar: tahliliy sharh // Kompyuterlar va kimyo muhandisligi. – 2020. – T. 137. – 106813.

14. Юсупбеков, Н. Р., Жумаев, О. А., & Исмоилов, М. Т. Ў. (2020). Ноаниқ мантиқ асосида интеллектуал бошқариш тизимларини ишлаб чиқиш. *Journal of Advances in Engineering Technology*, (2), 20-25.

15. Abdujaliliovich, J. O., Bakoyevich, M. G., & Eldor, A. (2021). Fuzzy logic controller in the management of technological processes of bacterial oxidation.

16. Karimov B. T., Xudoyberganov A. R. Sun’iy intellekt algoritmlarining o‘lchash signallarini qayta ishlashdagi roli // O‘zbekiston metrologiyasi jurnali. – 2022. – № 1. – B. 17–25.

17. Rumiantsev S. A. va boshq. Kimyoviy sensor signallarini Kalman va harakatlanuvchi o‘rtacha filtrlar bilan tozalash // *O‘lchash texnologiyalari jurnali*. – 2020. – T. 63, № 2. – B. 134–141.

18. Mirzayeva N. R. va boshq. Oltin ajratish jarayonida modifikatsiyalangan PVC-membranali elektrodlardan foydalanish // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2021. – T. 329. – 129233.

19. Ayupov U. T., Abdusamatova M. S. IoT asosidagi monitoring tizimlarida LoRa va Wi-Fi texnologiyalari // Telekommunikatsiya va avtomatlashtirish texnologiyalari jurnali. – 2023. – № 2. – B. 31–36.