

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ  
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

## Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 78

N 1 2025

ՀՈՒՆՎԱՐ – ՄԱՐՏ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И  
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 78

N 1 2025

ЯНВАРЬ – МАРТ

ЕРЕВАН 2026

---

---

## PROCEEDINGS

OF THE REPUBLIC OF ARMENIA NATIONAL ACADEMY OF  
SCIENCES AND NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF  
ARMENIA

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 78

N 1 2025

JENUARY – MARCH

YEREVAN 2026

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

**ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵԳԻԱ**

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Խաչատրյան Ա.Ժ., ֆ.մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Պատասխանատու քարտուղար՝ Մելքանյան Ժ.Ս., ՀՀ  
Խմբագրական կոլեգիա՝  
Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Բաղդասարյան Ս.Զ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Գռնեյմա Ս., տ.գ.թ., Եգիպտոս  
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի  
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա  
Ջոքյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ  
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս  
Լան Չ., տ.գ.թ., Չինաստան  
Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ  
Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա  
Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ  
Հահանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,  
Ուկրաինա  
Մանդալիկա Ս., տ.գ.թ., Հնդկաստան  
Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ  
Միխայլիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս  
Շլիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա  
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան  
Չապլիզին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ  
Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ  
Մապատենկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ  
Միմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Ստեմպկովսկի Ա.Լ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ  
Վորոբյով Ա.Ե., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ  
Տիխոմիրով Գ.Վ., ֆ.-մ.գ.դ., ՌԴ  
Ցանովա Ս., տ.գ.թ., Բուլղարիա  
Ուբար Ռ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա  
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор Меликян В.Ш.**, член-корр. НАН РА., д.т.н., проф., Армения

**Заместитель главного редактора Хачатрян А.Ж.**, д.ф.-м.н., проф., Армения

**Ответственный секретарь Сейранян Ж.С.**, Армения

### **Редколлегия:**

**Агбалян С.Г.**, д.т.н., проф., Армения

**Акопян В.Н.**, д.ф.-м.н., Армения

**Аслабян Л.А.**, член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

**Ахумян А.А.**, член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

**Багдасарян М.К.**, д.т.н., проф., Армения

**Багдасарян О.В.**, д.т.н., проф., Армения

**Воробьев А.Е.**, д.т.н., проф., Россия

**Гонейма М.**, к.т.н., Египет

**Гримблат В.**, к.т.н., Чили

**Докич Б.**, д.т.н., Босния и Герцеговина

**Зорян Е.**, к.т.н., США

**Ильющенко А.Ф.**, член-корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., Беларусь

**Красников Г.Я.**, академик РАН, д.т.н., проф., Россия

**Куртуа Б.**, к.т.н., Франция

**Лан Ч.**, к.т.н., Китай

**Мандалика С.**, к.т.н., Индия

**Марухян В.З.**, к.т.н., проф., Армения

**Михайлович А.А.**, д.т.н., проф., Беларусь

**Петросян О.А.**, д.т.н., проф., Армения

**Петросянц К.О.**, д.т.н., проф., Россия

**Сапатнекар С.**, к.т.н., США

**Симонян С.О.**, д.т.н., проф., Армения

**Стемпковский А.Л.**, академик РАН, д.т.н., проф., Россия

**Тихомиров Г.В.**, д.ф.-м.н., Россия

**Убар Р.**, академик НАН Эстонии, д.т.н., проф., Эстония

**Усанов В.И.**, д.т.н., проф., Россия

**Хаханов В.И.**, академик Академии наук Украины по прикладной радиоэлектронике, д.т.н., проф., Украина

**Цанова С.**, к.т.н., Болгария

**Чанг Ф.**, академик Национальной академии Тайваня, д.т.н., Тайвань

**Чаплыгин Ю.А.**, академик РАН, д.т.н., проф., Россия

**Шлихтманн У.**, к.т.н., Германия

## EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh.**, Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Deputy Editor-in-Chief: Khachatran A.Zh.**, Dr. of Phys-math Sci., Prof., Armenia  
**Executive Secretary: Seyranyan Zh.S.**, Armenia  
**Editorial Board:**  
**Aghbalyan S.G.**, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Aslanyan L.H.**, Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Baghdasaryan H.V.**, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Baghdasaryan M.Q.**, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Chang F.**, Member of National Academy of Taiwan, Sci.Dr., Taiwan  
**Chaplygin Yu.A.**, Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Courtois B.**, Ph.D., France  
**Dokic B.**, Sci.Dr., Bosnia and Herzegovina  
**Ghoneima M.**, Ph.Dr., Egypt  
**Grimblatt V.**, Ph.Dr., Chile  
**Hahanov V.I.**, Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine  
**Hakhumyan A.A.**, Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Hakobyan V.N.**, Sci.Dr., Armenia  
**Ilyushenko A.F.**, Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus  
**Krasnikov G.Y.**, Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Lan Ch.**, Ph.Dr., China  
**Mandalika S.**, Ph.Dr., India  
**Marukhyan V.Z.**, Ph.Dr., Prof., Armenia  
**Mikhailevich A.A.**, Sci.Dr., Prof., Belarus  
**Petrosyan O.H.**, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Petrosyants K.O.**, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Sapatnekar S.**, Ph.Dr., USA  
**Schlichtmann U.**, Ph.Dr., Germany  
**Simonyan S.H.**, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Stempkovski A.L.**, Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Tikhomirov G.V.**, Sci.Dr., Russia  
**Tsanova S.**, Sci.Dr., Bulgaria  
**Ubar R.**, Academician of Academy of Sciences of Estonia, Sci.Dr., Prof., Estonia  
**Usanov V.I.**, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Vorobyov A.Y.**, Sci.Dr., Prof., Russia  
**Zorian Y.**, Ph.Dr., USA

Հրատ. խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2024

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ն.Գ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Ս.Է. ՄԱՍՈՒՆՅԱՆ

**MAX-ՖԱՉԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

MAX-ֆազերը ( $M_{n+1}AX_n$ , որտեղ M-ը անցումային մետաղ է, A-ն՝ հիմնական խմբերի տարրը, X-ը՝ ածխածինը կամ ազոտը,  $n=1\dots3$ ) օժտված են յուրահատուկ ֆիզիկամեխանիկական հատկություններով, ինչպիսիք են բարձր ամրությունը, մածուցիկությունը, ջերմակայունությունը և էլեկտրամագնիսական բնութագրերը: Այս նյութերի պահանջարկը շատ մեծ է հատկապես միկրոէլեկտրոնիկայում: Սակայն MAX-ֆազերի զանգվածային արտադրությունը դեռևս մնում է չլուծված և հանդիսանում է հրատապ խնդիր:

Աշխատանքում վերլուծվել են MAX-ֆազերի ստացման գոյություն ունեցող մեթոդները, ներառյալ MAX-ֆազերով համակցված նյութերի ստացման հրամետալուրգիական եղանակը, ծակոտկեն մամլվածքների եռակալումը, քիմիական գոլորշիների նստեցումը (ՔԳՆ), բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզը (ԲԲՄ), համակցված MAX-ֆազերի ստացման կերամիկական եղանակը: Արդյունքում առաջարկվել է օպտիմալ տեխնոլոգիական սխեմայի ընտրում և հիմնավորում՝ հետագա ներդրման նպատակով:

Աշխատանքում ուսումնասիրվել է երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազերի ստացման գործընթացը ԲԲՄ մեթոդով: Կատարվել են ստացված նմուշների ռենտգենակառուցվածքային, ռենտգենաապեկտրային և մորֆոլոգիական վերլուծություններ: Ցույց է տրվել, որ ԲԲՄ մեթոդը արդյունավետ է հատկապես բարձր ելքով և էներգիայի նվազագույն ծախսերով MAX-ֆազեր ստանալու դեպքում: Ստացված նմուշներն ունեն խիտ բյուրեղային կառուցվածք և միատարր ֆազային բաշխվածություն, ինչը դրանք հեռանկարային է դարձնում բարձրջերմաստիճանային ծածկույթների ստացման, էլեկտրոնիկայի և այլ ոլորտներում օգտագործելու համար: Դիտարկվել են նաև սինթեզի պայմանների օպտիմալացման և օգտագործվող տարրերի համակցությունների ընդլայնման հետագա հետազոտությունների հեռանկարները:

MAX-ֆազ ստանալու համար սինթեզի օպտիմալ պայմաններն ընտրվել են՝ համաձայն  $(Fe,Ti)_3(Al,Si)_2C_2$  բանաձևի: Ցույց է տրվել, որ ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի և ածխածնի փոշիներից պատրաստված բովախառնուրդից ԲԲՄ մեթոդով ստացվել է փոշեման արգասիք, որում MAX-ֆազի պարունակությունը կազմել է 93% ըստ զանգվածի, որտեղ երկաթով հարուստ  $Fe_3Si_3$ ,  $Fe_3Si$  և  $FeSi$  ֆազերի պարունակությունը հիմնական զանգվածին տալիս է ֆերոմագնիսական հատկություններ: Չլուծվող խառնուրդի պարունակությունը՝ ըստ զանգվածի, կազմում է 7% (5%  $Ti_3Si_3$  և 2%  $TiC$ ): Ստացված MAX-ֆազերի միկրոկառուցվածքն ունի շերտավոր, լամինատային տեսք և օժտված է ֆերոմագնիսական հատկություններով:

**Առանցքային բառեր.** Max-ֆազեր, բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզ, մետաղափոշիներ, փոշեմետալուրգիա, եռակալում, բյուրեղային կառուցվածք, ֆազային փոխակերպումներ:

**Ներածություն:** Գիտության և տեխնիկայի ժամանակակից ոլորտների զարգացումը պահանջում է նոր, համալիր հատկություններով օժտված նյութերի ստեղծում, որոնք կպարունակեն բազմաթիվ հատկություններով օժտված բաղադրիչներ: Այդպիսի նյութերի դասին են պատկանում MAX-ֆազերը, որոնք միաժամանակ ունեն երկակի հատկություններ. մի կողմից՝ մետաղների նման ցուցաբերում են բարձր էլեկտրահաղորդականություն և ջերմահաղորդականություն, իսկ մյուս կողմից՝ կոմպոզիտային նյութերի նման ունեն բարձր ամրություն, պլաստիկություն, ջերմակայունություն, կոռոզիակայունություն, թեթև են, ծակոտկեն և ունեն ջերմային ընդարձակման ցածր գործակից: Այս նյութերը կայուն են բարձր ջերմաստիճանային օքսիդացման նկատմամբ, հեշտ ենթարկվում են մեխանիկական մշակման, ունեն բարձր հալման ջերմաստիճան և չեն կորցնում իրենց կայունությունը  $1000^{\circ}\text{C}$ -ից բարձր ջերմաստիճաններում: Այս համալիր հատկությունների զուգակցումը բացատրվում է MAX-ֆազերի յուրահատուկ բազմաֆազ և շերտավոր կառուցվածքով, որոնք պարունակում են ստեխիոմետրական բաղադրությամբ մետաղների կարբիդներ, սիլիցիդներ, ինչպես նաև ինտերմետաղական ֆազեր [1]:

MAX-ֆազերը հետազոտողների կողմից հայտնաբերվել են 20-րդ դարի կեսերին, երբ ակադեմիկոս Վ.Ա. Բուբովը և նրա գործընկերներն ուսումնասիրեցին ածխածնի և նիտրիդային միացությունների կառուցվածքն ու հատկությունները: Նրանք պարզեցին, որ որոշ միացություններ ունեն անսովոր բյուրեղային կառուցվածք, որը չի կարող դասակարգվել որպես բնորոշ կերամիկա կամ մետաղ [2]: MAX-ֆազերի ստեղծման առանցքային կետերից մեկն էլ այն էր, որ դրանք մաքուր տարրերի և միացությունների միջև համակարգային ֆազերն են, այդ իսկ պատճառով դրանք երբեմն կոչվում են «առավելագույն ֆազեր» կամ «MAX-ֆազեր»:

MAX-ֆազերի սինթեզի մասին առաջին զեկույցները կատարվել են Նովոսնիի և այլոց աշխատություններում, որոնք գրվել են անցյալ դարի 60-ական թվականներին: Բացի դրանից, 1967 թվականին սինթեզվեց եռակի սիլիցիումի կարբիդը՝  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  ֆազը, որը հետագայում դարձավ ամբողջ ընտանիքի նախատիպը և առայժմ ամենաուսումնասիրվածն է [3, 4]:

MAX-ֆազերը եռաշերտ միացությունների ընտանիք են, որոնք ունեն  $M_{n+1}AX_n$  տիպի ստեխիոմետրիա ( $n = 1, 2, 3\dots$ ), որտեղ M-ն անցումային d-մետաղ է, A –ն՝ p-տարր (օրինակ՝ Si, Ge, Al, S, Sn և այլն), X-ն՝ ածխածին կամ ազոտ (նկ. 1):

1																	18
H	2	M = Առաջին խմբերի անցումային տարրն է X = Ա խմբի տարրն է X = O կամ N										13	14	15	16	17	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Uuq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une									

Նկ. 1. Ընդհանուր բաղադրությամբ նանոլամինատների ձևավորման [3, 4] տարրերի պարբերական աղյուսակ

MAX-ֆազերի ստացման եղանակների ընտրությունը որոշիչ դեր է խաղում դրանց կառուցվածքի և հատկությունների ձևավորման գործում: Մետալուրգիական եղանակները հնարավորություն են տալիս ստանալ բարձր մաքրությամբ MAX-ֆազեր, սակայն պահանջում են զգալի էներգիա և ժամանակ: Կերամիկական եղանակները հայտնի են իրենց պարզությամբ և մատչելիությամբ, բայց կարող են զիջել վերջնանյութի արդյունավետությամբ և որակով: Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՄ) եղանակն առանձնանում է իր արդյունավետությամբ և նյութերի արագ սինթեզի հնարավորությամբ:

Աշխատանքի նպատակն է կատարել MAX-ֆազերի ստացման տարբեր եղանակների վերլուծություն՝ օպտիմալ տեխնոլոգիական սխեմայի բացահայտման նպատակով, ինչպես նաև ուսումնասիրել երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազերի ստացման տարբեր մեթոդներ, ընտրել օպտիմալ մեթոդը, ԲԻՄ մեթոդով սինթեզել նմուշներ և ուսումնասիրել դրանց հատկությունները:

**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազերի ստացման մեթոդներից է փոշեմետալուրգիական մեթոդը, որի դեպքում մետաղների և ոչ մետաղների փոշիները խառնվում են պահանջվող չափաբաժիններով, այնուհետև ենթարկվում եռակալման բարձր ջերմաստիճաններում: Այս եղանակով MAX-ֆազեր ստանալու համար անհրաժեշտ է ջերմաստիճանի և ճնշման մանրակրկիտ վերահսկում, որպեսզի ապահովվի բյուրեղային ճիշտ կառուցվածքի ձևավորումը:

Առավելություններից են բաղադրության և կառուցվածքի լավ վերահսկումը և բարդ կոմպոզիտային նյութեր ստեղծելու հնարավորությունը:

Որպես թերություն պետք է նշել, որ պահանջվում են երկարատև տաքացման ցիկլեր, ինչպես նաև հնարավոր է խնդիրների առաջացում ֆազերի քիմիական մաքրության հարցում:

Գոլորշիների քիմիական նստեցման մեթոդը (ԳՔՆ) ներառում է գազային կամ հեղուկ ֆազում տարրերի միջև ռեակցիան, որին հաջորդում է պինդ նյութի ձևավորումը: Այս մեթոդը հնարավորություն է տալիս ստանալ MAX ֆազեր բարձր մաքրությամբ, սակայն այն պահանջում է բարդ սարքավորումներ և ժամանակատար գործընթաց է: Գոլորշիների քիմիական նստեցման տեխնոլոգիայի դեպքում ենթաշերտի մակերևույթի վրա ձևավորվում է մետաղների կամ միացությունների բարակ թաղանթապատ ծածկույթ, որի արդյունքում նյութի մակերեսը կարող է փոփոխվել մաշակայունության, օքսիդացման և կոռոզիոն կայունության, ինչպես նաև էլեկտրական, օպտիկական, շփագիտական և այլ հատուկ հատկությունների պահանջներին համապատասխան: Այս տեխնոլոգիայի առավելություններից պետք է նշել ստացված նյութի բարձր մաքրությունը և քիմիական կազմի ճշգրիտ հսկողությունը: Որպես թերություն պետք է նշել բարձր արժեքը և տեխնոլոգիական գործընթացի բարդությունը:

Համակցված MAX-ֆազային համաձուլվածքների արտադրության հրամետալուրգիական մեթոդները մետալուրգիայի և նյութագիտության ոլորտում հեռանկարային մոտեցումներից են: Այս մեթոդները հնարավորություն են տալիս ստանալ եզակի նյութեր, որոնք համատեղում են կերամիկայի և մետաղների հատկությունները:

Ընդհանուր մոտեցումներից մեկը բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի մեթոդն է, երբ մետաղի և կերամիկական փոշիների միջև սկսվում է այրման ռեակցիա՝ ցանկալի կառուցվածքով և հատկություններով MAX-ֆազ ձևավորելու նպատակով: Այս գործընթացը սովորաբար տեղի է ունենում արագ և առաջացնում է բարձր ջերմաստիճաններ, ինչը հանգեցնում է MAX-ֆազի ձևավորմանը մեկ քայլով: Գործընթացը համեմատական իմաստով պարզ և էներգաարդյունավետ է: Մեկ այլ մեթոդ ներառում է դինամիկ եռակալում, երբ մետաղափոշուց և կերամիկական նյութերի փոշիներից պատրաստված բովախառնուրդը եռակալվում է բարձր ջերմաստիճանում՝ նպաստելու համար MAX-ֆազի առաջացմանը պինդ ֆազային ռեակցիաների միջոցով: Հրամետալուրգիական այս մեթոդներն ունեն առավելություններ, ինչպիսիք են արագ մշակումը, բարձր մաքրությունը և բարդ կոմպոզիտային նյութեր ստանալու ու արտադրելու հնարավորությունը:

Հրամետալուրգիական մեթոդներով ստացված MAX-ֆազային համաձուլվածքների որոշ օրինակներից են Ti-Al-C, Ti-Si-C, Cr-Al-C, Nb-Al-C, ինչպես նաև այլ համակարգերով MAX-ֆազային հիմքով կոմպոզիտային նյութերը՝ մետաղական, կերամիկական կամ միջմետաղական ֆազերի ներառումներով: Սրանք բազմաշերտ և զրադիենտ նյութեր են, որոնք համատեղում են տարբեր MAX-ֆազեր և այլ բաղադրիչներ: Նման նյութերը ցուցաբերում են հատկությունների յուրահատուկ համադրություն, ներառյալ բարձր ամրությունը, ջերմակայունությ-

յունը, մաշակայունությունը և կոռոզիոն կայունությունը, ինչը դրանք դարձնում է կիրառելի տարբեր ոլորտներում: Այս նյութերի առավելություններից են բարձր պլաստիկությունը և մածուցիկությունը՝ հատկապես սենյակային ջերմաստիճաններում, ինչը բնորոշ չէ կերամիկական նյութերին, ունեն նաև բարձր մեխանիկական հատկություններ, շատ բարձր ջերմակայունություն և էլեկտրահաղորդականություն:

MAX-ֆազային համաձուլվածքների ստացումը հրամետալուրգիական մեթոդներով կարող է լինել բարդ և ծախսատար, քանի որ պահանջվում են մաքուր մետաղներ, բարդ տեխնոլոգիաներ և ջերմաստիճանի, ճնշման ու ժամանակի մանրակրկիտ կառավարում, ինչպես նաև որոշ M և A խմբերի տարբեր՝ սինթեզի համար, թանկ են և հազվագյուտ:

MAX-ֆազերի ( $M_{n+1}AX_n$ ) ստացման ավանդական մեթոդներից են եռակալումը և հալումը: Նախ պատրաստվում են բաղադրիչները փոշու տեսքով, ներառյալ անցումային մետաղները (M), գլխավոր A խմբի տարբերը (օրինակ՝ սիլիցիում, ալյումին և այլն) և ածխածինը կամ ազոտը (X): Այս բաղադրիչները խառնվում են որոշակի մոլային հարաբերակցությամբ: Ստացված բովախառնուրդը լցվում է մայրակի մեջ և եռակալվում բարձր ջերմաստիճանում, որը սովորաբար կատարվում է վակուումում կամ պաշտպանիչ մթնոլորտում՝ օքսիդացումից խուսափելու համար: Եռակալման ջերմաստիճանը սովորաբար տատանվում է մի քանի հարյուրից մինչև մի քանի հազար աստիճան Ցելսիուս՝ կախված MAX-ֆազի բաղադրությունից և պահանջվող հատկություններից: Եռակալումից հետո նախապատրաստվածքը սառչում է, և ստացվում պինդ միաձույլ MAX-ֆազի կառուցվածք: Կարևոր քայլը սառեցման արագության վերահսկումն է՝ ներքին լարումներից և դեֆորմացիաներից խուսափելու համար:

Հալեցման մեթոդի դեպքում, ինչպես եռակալման ժամանակ, MAX-ֆազի բաղադրիչները խառնվում են փոշու կամ հատիկների տեսքով, որպեսզի ապահովվի դրանց բաղադրամասերի հավասարաչափ բաշխումը: Խառնուրդը բեռնվում է վառարանի մեջ և տաքացվում մինչև հալման ջերմաստիճանը, որը սովորաբար ավելի բարձր է, քան ամենադժվարահալ բաղադրիչի հալման ջերմաստիճանն է, օրինակ՝ տիտանի կամ սիլիցիումի կարբիդը: Հալումը տեղի է ունենում մթնոլորտի վերահսկողության տակ կամ վակուումում՝ օքսիդացումից խուսափելու համար: Հալվելուց հետո խառնուրդը սառչում է մինչև սենյակային ջերմաստիճան, ինչը հանգեցնում է տրված կառուցվածքով և քիմիական բնութագրերով պինդ Max-ֆազի ձևավորմանը:

Եռակալման և հալման մեթոդները, MAX-ֆազերի ստացման համար, ունեն յուրահատուկ առավելություններ ու թերությունները: Եռակալումը թույլ է տալիս ավելի լավ վերահսկել ֆազային անցումները և պահանջում է ավելի քիչ էներգիա,

բայց այն երկարատև է և երբեմն պահանջում է բարձր ճնշում: Հալումը, մյուս կողմից, թույլ է տալիս ավելի արագ ստանալ բարձր խտությամբ նյութեր, բայց այն շատ էներգատար է և պահանջում է հսկողություն սահմանել սառեցման գործընթացի նկատմամբ:

Երկու մեթոդներն էլ ունեն իրենց առավելություններն ու թերությունները՝ կախված MAX-ֆազի հատուկ պահանջներից, ինչպիսիք են բարձր տեսակարար ամրությունը, կառուցվածքային համասեռությունը, մաշակայունությունը և ջերմակայունությունը: Մեթոդի ընտրությունը կախված է արտադրության հատուկ պայմաններից և վերջնական արտադրանքի պահանջներից:

MAX-ֆազային նյութերի ստացման բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՍ) գործընթացը հիմնված է բաղադրիչների միջև էկզոթերմիկ ռեակցիայի վրա, որոնք ինքնաբերաբար տարածում են ռեակցիան ամբողջ նմուշում: Այս մեթոդը բարձր ջերմաստիճանի հետևանքով օգտագործվում է հրակայուն միացությունների սինթեզի համար, ինչպիսիք են MAX-ֆազերը:

Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզը (ԲԻՍ)՝ որպես դժվարահալ միացությունների ստացման նոր մեթոդ, հայտնաբերվել է ռուս գիտնականներ Ա.Գ. Մերժանովի, Ի.Պ. Բորովիևսկու և Վ.Մ. Շկիրնի կողմից 1967 թ. [5]:

ԲԻՍ-ի հիմքում ընկած է երկու և ավելի քիմիական տարրերի կամ միացությունների էկզոթերմիկ փոխազդեցության ռեակցիան, որն ընթանում է ուղղորդված այրման ռեժիմում: Գործընթացն իրականացվում է էլանյութերի փոշիներից պատրաստված բովախառնուրդի մանրահատ շերտում՝ ռեակցիայի տեղային բռնկումից հետո, և տարածվում է ամբողջ համակարգով՝ շնորհիվ չտաքացված էլանյութերի բարձր ջերմահաղորդականության: Ռեակցիայի տարածման արագությունը և ջերմաստիճանը կախված են մի շարք ֆիզիկաքիմիական պարամետրերից [6]՝ թերմոդինամիկական, ֆիզիկական, տեխնոլոգիական և քիմիական:

ԲԻՍ գործընթացների ընդհանուր բանաձևը կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$\Sigma X_i + \Sigma Y_j = \Sigma Z_k + Q, \quad (1)$$

որտեղ  $X_i$ -ը մետաղն է պինդ վիճակում (օրինակ՝ Mg, Al, Ti, Zr, Nb, Cr, Mo, Ni),  $Y_j$ -ն՝ ոչ մետաղը պինդ, հեղուկ կամ գազանման վիճակում (օրինակ՝ C, B, Si, S, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>),  $Z_k$ -ն՝ սինթեզի նյութերը (կարբիդներ, բորիդներ, սիլիցիդներ, սելենիդներ, նիտրիդներ, օքսիդներ, հիդրիդներ, պինդ լուծույթներ, ինտերմետաղական ֆազեր (եթե որպես Yj հանդես է գալիս մետաղը), Q-ն՝ էկզոթերմիկ ռեակցիայի ընթացքում անջատվող ջերմությունը:

ԲԻՍ-տեխնոլոգիաների գլխավոր առավելությունները, դժվարահալ միացությունների և դրանց հիման վրա նյութերի ստացման այլ մեթոդների համեմատ, այն է, որ գործընթացներն ընթանում են քիմիական ռեակցիայի ջերմության հաշ-

վին, և տաքացման համար չի պահանջվում լրացուցիչ ջերմային էներգիա: Գործընթացի արտադրողականությունը հիմնականում որոշվում է այրման արագությամբ, որը կազմում է 10...30 մմ/վրկ: Սինթեզի նյութերը բնութագրվում են բարձր մաքրությամբ, քանի որ այրման ջերմաստիճանը կազմում է 2000...3000<sup>0</sup>C, և շատ խառնուրդներ քայքայվում են կամ ցնդում: ԲԻՍ գործընթացի բարձր ջերմաստիճանը թույլ է տալիս մեկ փուլով ստանալ պարզ և բազմաբաղադրիչ միացություններ անմիջապես այրման ալիքում: ԲԻՍ տեխնոլոգիայի մյուս առավելությունը կոմպոզիտային նյութերի սինթեզի հնարավորությունն է, որոնց ստացումն այլ հայտնի մեթոդներով պահանջում է մեծ ծախսեր և բարդ ու թանկարժեք սարքավորումներ, իսկ որոշ դեպքերում ուղղակի անհնար է [7]: ԲԻՍ-տեխնոլոգիան հաջողությամբ կիրառվում է նաև տարբեր բազմաբաղադրիչ MAX-ֆազերի սինթեզի դեպքում:

Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի մեթոդը ընտրվել է երկայթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազեր ստանալու համար, որն ուղղակիորեն պայմանավորված է հետազոտության ներքոհիշյալ պահանջներով:

**1. Ռեակցիայի բարձր ջերմաստիճանը:** MAX-ֆազերը բարդ միացություններ են, որոնք պահանջում են բարձր ջերմաստիճաններ՝ կայուն կառուցվածք ձևավորելու համար: ԲԻՍ-ը բաղադրիչների էկզոթերմիկ ռեակցիայի շնորհիվ կարողանում է հասնել պահանջվող ջերմաստիճանի, որն ապահովում է ֆազերի արդյունավետ ձևավորումը՝ առանց երկարատև արտաքին տաքացման անհրաժեշտության:

**2. Գործընթացի արագությունը:** Ի տարբերություն ավանդական սինթեզի մեթոդների, ինչպիսիք են փոշեմետալուրգիական կամ քիմիական նստեցումը, ԲԻՍ-ը չափազանց արագ գործընթաց է: Էկզոթերմիկ ռեակցիան նմուշի միջով տարածվում է վայրկյանների ընթացքում, ինչը զգալիորեն նվազեցնում է սինթեզի ժամանակը և մեթոդը դարձնում հատկապես նախընտրելի մեծածավալ արտադրության համար:

**3. Պարզություն և ծախսարդյունավետություն:** ԲԻՍ-ը չի պահանջում բարդ սարքավորումներ և բարձր ջերմաստիճանի երկարաժամկետ պահպանում, ինչպես քիմիական նստեցման կամ փոշեմետալուրգիայի մեթոդների դեպքում: Սա գործընթացը դարձնում է ավելի ծախսարդյունավետ, հատկապես, երբ սինթեզվում են բարձրջերմաստիճանային նյութեր, ինչպիսիք են MAX-ֆազերը:

**4. Ստացված արտադրանքի մաքրությունը:** Ռեակցիայի արագության և շրջակա միջավայրի հետ նվազագույն փոխազդեցության շնորհիվ՝ ԲԻՍ մեթոդը թույլ է տալիս ստանալ MAX-ֆազեր՝ համեմատաբար բարձր մաքրության աստիճանով, ինչը կարևոր է այն նյութերի դեպքում, որոնք նախատեսված են օգտա-

գործելու համար բարձր տեխնոլոգիաների ոլորտներում, օրինակ՝ էլեկտրոնիկայի կամ օդատիեզերական ճարտարագիտության մեջ):

**5. Կիրառելիությունը երկաթ-սիլիցիումային համակարգերի դեպքում:** ԲԻՍ-ի արդյունավետությունն ապացուցվել է երկաթի և սիլիցիումի վրա հիմնված հրակայուն միացությունների և նյութերի սինթեզի գործընթացում, ինչը այն հարմար է դարձնում այս հետազոտության համատեքստում պահանջվող բազմաբաղադրիչ MAX-ֆազերը ստանալու համար:

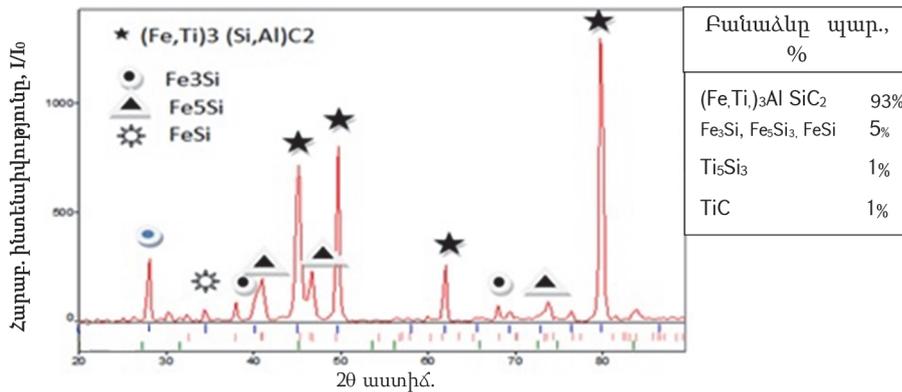
**Հետազոտության արդյունքները:** Բարձրջերմաստիճանային սինթեզի մեթոդով նմուշների պատրաստման համար օգտագործվել են հետևյալ փոշիները՝ ΦC-75 մակնիշի FeSi (25% Si, 2...4 մկմ հատիկաչափական կազմով), տեխնիկական ածխածին (մուր) Π-701 մակնիշի (99,5%, 2...4 մկմ հատիկաչափական կազմով), ΠTC մակնիշի Ti (մաքրությունը 99%, մասնիկների միջին չափսը 3...6 մկմ), ΠA-4 մակնիշի ալյումինի փոշի (99%, 50 մկմ հատիկաչափական կազմով): Նշված նյութերի փոշիները ըստ զանգվածի որոշակի չափաբաժիններով խառնվել են ճենապակյա տարողության մեջ մինչև համասեռ զանգվածի ստացումը: Սինթեզն իրականացվել է մթնոլորտային ճնշման պայմաններում տիտան-ռենիումային համաձուլվածքից պատրաստված ռեակտորի մեջ, որում նախապես լցվել է ավազ: Ավազի կենտրոնական մասում արվել է փոսիկ, որտեղ տեղադրվել է բովախառնուրդը: Որպես հարուցիչ օգտագործվել է Ti-ի և C-ի խառնուրդը: Շիկացած լարով սկիզբ է դրվել ԲԻՍ գործընթացին: Այրման ալիքը տարածվում է վերևից ներքև, որի արդյունքում սինթեզվում է համաձուլվածքը: Այրումը տևել է 25...30 վրկ, որից հետո համաձուլվածքը սառեցվել է օդում: Մեխանիկական եղանակով համաձուլվածքն անջատվել է խարամից և ենթարկվել ռենտգենաֆազային վերլուծության (ՌՖՍ): Ֆազային բաղադրության ուսումնասիրությունն իրականացվել է ռենտգենային Ultima IV (Rigaky) դիֆրակտորի միջոցով  $Cu\alpha$ -ճառագայթամբ: Նմուշների կառուցվածքի ուսումնասիրությունն իրականացվել է «Mira» տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակով «Tescan» ֆիրմայի արտադրության (Չեխիա) «Aztec» անալիզատորով: ԲԻՍ գործընթացով MAX-ֆազի ստացման սարքի աշխատանքը նկարագրված է [8, 9] աշխատանքներում:

ԲԻՍ մեթոդով MAX-ֆազ ստանալու փորձերն իրականացվել են աշխատանք [10]-ում նկարագրված մեթոդի համաձայն: Ստացված արգասիքները ենթարկվել են տարբեր վերլուծությունների:

(Fe,Ti)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>2</sub> բանաձևով MAX-ֆազերի ստացման համար նախապատրաստվել են երեք բաղադրություններ՝ FeSi-10, 20 և 30% ավելցուկով: Նախնական բովախառնուրդը պատրաստվել է բաղադրիչների տարատեսակ քանակաչափական հարաբերակցություններով՝ 3Ti-1(Al,Si)-2C-1FeSi, 3Ti-1Al-2C-2FeSi, 3Ti-1Al-2C-3FeSi: Լավագույն արդյունքները, ինչպես ենթադրվում էր, ստացվել է 30% FeSi-ի ավել-

ցուկի դեպքում, քանի որ վերջինիս ավելացմանը զուգահեռ ավելացել է նաև երկաթի պարունակությունը, որն իր հերթին հանգեցնում է մագնիսական բարձր հատկություններով համաձուլվածքի ստացմանը: Նշված բովախառնուրդներից ԲԻՍ մեթոդով ստացվել են մետաղական զանգվածներ, որոնք օգտագործվել են որպես ուսումնասիրության առարկա տարբեր վերլուծությունների ժամանակ:

Նկ. 2-ում ներկայացված են ստացված MAX-ֆազի ռենտգենաֆազային վերլուծության ռենտգենագրերը և ֆազային կազմը, համաձայն որի՝ սինթեզի արդյունքում ստացված արգասիքն են՝ հիմնական ֆազը  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$  է (93 զանգ. %), երկաթի սիլիցիդները (5 զանգ. %), ինչպես նաև տիտանի կարբիդը (1 զանգ. %) և սիլիցիդը  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  (1 զանգ. %): Արդյունքից հետևում է, որ ստացված հիմնական MAX-ֆազն ունի անհամաչափ կառուցվածք: Հիմնական միատարր զանգվածում կան տարբեր ներդրված ֆազեր, որոնք հիշեցնում են երկաթ պարունակող տարբեր սիլիցիդներ: Չի բացառվում նաև տիտանի և ալյումինի կարբիդների և սիլիցիդների պարունակությունը, ինչպես ցույց է տալիս ռենտգենաֆազային անալիզը (նկ. 2):



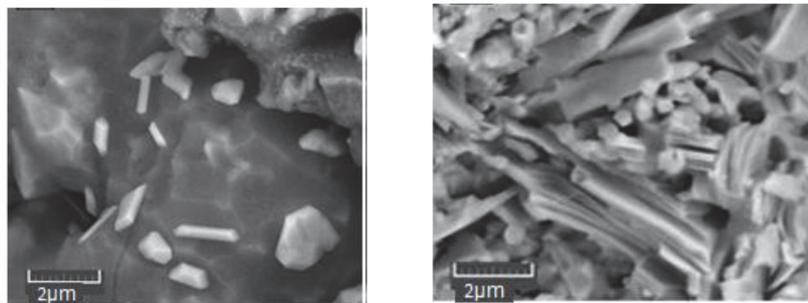
Նկ. 2. ԲԻՍ գործընթացով ստացված արգասիքի ռենտգենագիրը FeSi 30 % ավելցուկի դեպքում

Փորձերը ցույց են տվել, որ ԲԻՍ մեթոդով ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի և ածխածնի փոշիներից կարելի է ստանալ MAX-ֆազեր ոչ հոմոգեն կառուցվածքով, որի հիմնական մասը  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ -ն է, ինչպես նաև պարունակում է տարբեր չափերի և ձևերի սիլիցիդների, տիտանի և երկաթի կարբիդների պինդ լուծույթներ: Կարելի է նշել, որ ֆազագոյացման ժամանակ տիտանն ու երկաթը նույն վարքագիծն են ցուցաբերում սիլիցիդների և կարբիդների նկատմամբ, ինչպես ցույց է տրված նախնական թերմոդինամիկական հաշվարկներով:

Այսպիսով, սինթեզի արդյունքում ստացվել է երկֆազ նյութ, որը պարունակում է կրկնակի կարբիդի  $(\text{Fe,Ti})\text{C}$  խառնուրդ և MAX-ֆազ  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$  (նկ. 3 ա, բ): Կառուցվածքային տվյալների օգտագործմամբ նյութի քանակական վերլու-

ծությունը ցույց է տվել, որ ներառումների պարունակությունը կազմում է 7 զանգվածային %, իսկ  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$  ֆազի պարունակությունը՝ 93 զանգվածային %:

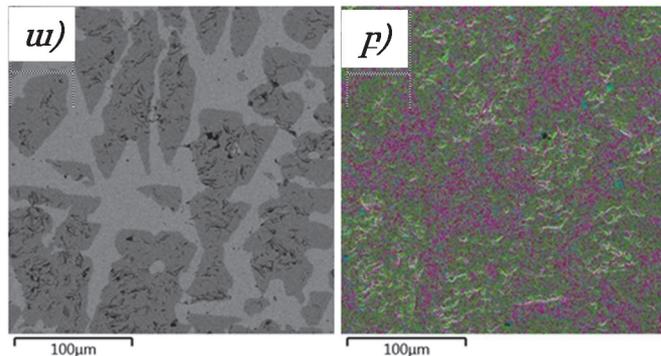
Ինչպես երևում է նկ. 4ա-ից, մետաղական ֆազը բաղկացած է հիմնական ֆազերից, ինչպես նաև երկաթի սիլիցիդների համար բնորոշ սև կետերից: Հունգենացման գործընթացում երկաթի սուլֆիդային ֆազերի փոխազդեցությունն ուղեկցվում է  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$  տիպի պինդ լուծույթների ձևավորմամբ՝ անկանոն կառուցվածքով: Երկաթի սիլիցիդներով հարստացված ֆազը առավելապես տեղակայված է մետաղի հատիկի սահմանի երկայնքով: Այդ ֆազերի հատիկները 25...50 մկմ չափսի են և հստակ պահպանում են իրենց սահմանները:



ա)

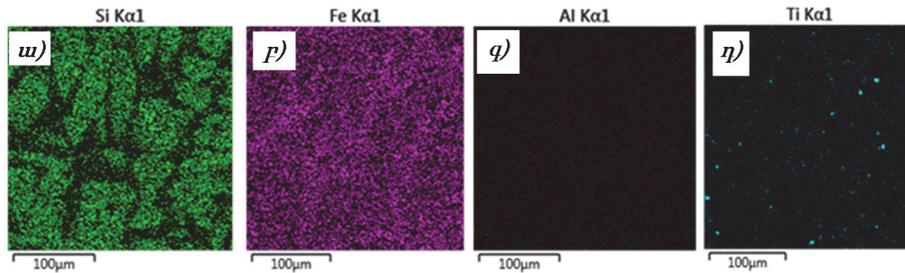
բ)

Նկ. 3. *ԲԻՄ մեթոդով ստացված նյութի կառուցվածքը Ti-Fe-Si-Al-C համակարգում՝ ա - x500, բ - x10000*



Նկ. 4. *Ստացված MAX-ֆազի բաղադրությունը և միկրոպատկերը x500*

Ստացված արգասիքների կառուցվածքը և ներդրված սիլիցիդների բաշխումը ըստ չափերի և ձևի ավելի ճիշտ գնահատելու համար կատարվել է կառուցվածքային վերլուծության նոր՝ ժամանակակից միկրոռենտգենասպեկտրային (ՄՌՄԱ) անալիզարարի վրա, որն աշխատում է ավտոմատ ռեժիմով: Հետազոտության արդյունքները ներկայացված է նկ. 5-ում:



Նկ. 5. EDS մեթոդով ստացված փորձանմուշի հետազոտության արդյունքները.  
*ա - գ - քարտեզի վրա ՄԿՄԱ-ի արդյունքները*

Ստորև ներկայացված է տարրերի ընդհանուր պարունակությունը ըստ սպեկտրների (աղյուսակ):

*Աղյուսակ*

*Տարրերի ընդհանուր պարունակությունը*

Սպեկտրի համարները	Al	Si	Ti	C	Fe
Սպեկտր 1	0,54	22,65	7,68	1,18	67,95
Սպեկտր 2	0,46	22,84	6,85	1,33	68,52
Սպեկտր 3	0,38	22,82	6,76	0,93	68,95
Միջինը	0,46	22,82	7,04	0,81	68,47

Ինչպես երևում է աղյուսակից, համաձուլվածքում առանձին տարրերի բաշխումը նույնպես անհավասար է: Հիմնականում համաձուլվածքում գերակշռում են սիլիցիումը, երկաթը և տիտանը: Այլումինի քանակությունը փոքր է (նկ. 5 գ), որը, ըստ երևույթին, կապված է խարամի մեջ նրա անցման հետ:

**Եզրակացություն:** Հետազոտության ընթացքում հաջողությամբ սինթեզվել է նյութերի նոր դաս՝ երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազեր՝ օգտագործելով ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզի (ԲԻՍ) մեթոդը: Ստացված արդյունքները հաստատում են այս մեթոդի արդյունավետությունը MAX-ֆազերի սինթեզի դեպքում՝ շնորհիվ հետևյալ ձեռքբերումների.

1. **ԲԻՍ մեթոդի արդյունավետությունը.** Ռեակցիաների արագ և էկոթերմիկ ընթացքը հնարավորություն տալիս նվազագույն էներգիայի ծախսերով և կարճ ժամանակում ստանալ նպատակային MAX-ֆազերը: Ռեակցիայի ընթացքում տաքացման առավելագույն ջերմաստիճանը հասել է 2500°C-ի, որն ապահովել է ելանյութերի ամբողջական փոխակերպումը:

2. **Ռենտգենակառուցվածքային վերլուծություն.** Ռենտգենակառուցվածքային վերլուծությունը հաստատել է MAX-ֆազերին բնորոշ բյուրեղային կառուցվածքների առաջացումը: Արդյունքները ցույց են տվել, որ սինթեզի հիմնական ֆազը պարունակում է երկրորդական ֆազերի չնչին քանակներ:

3. **Միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծություն.** Միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծությամբ (ՄՌՍԱ) նմուշների տարրական կազմի ուսումնասիրությունը ցույց է տվել, որ ստացված կազմը համապատասխանում է հաշվարկված ստեխիոմետրական գործակիցներին, ինչը հաստատում է սինթեզի մաքրության բարձր աստիճանը:

4. **Մորֆոլոգիական վերլուծություն.** Սկանավորող էլեկտրոնային մանրադիտակով (SEM) ուսումնասիրվել են սինթեզված նյութերի մորֆոլոգիան և մակերեսային կառուցվածքը: Նմուշները բնութագրվում են խիտ կառուցվածքով՝ նվազագույն ծակոտկենությամբ և համասեռ ֆազային բաշխմամբ, ինչը կարևոր է բարձր տեխնոլոգիական ոլորտներում այդ նյութերի հետագա օգտագործման համար:

Որոշվել են սինթեզված ֆազի՝  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$  բյուրեղագրական պարամետրերը: Պարզվել է, որ այս ֆազը պատկանում է վեցանկյուն սինգոնիային և ներկայացնում է պինդ լուծույթ, որի կառուցվածքում Ti և Fe ատոմները անկանոն են դասավորված մետաղ-ածխածնային շերտում՝ կառուցվածքում հավասար բաժիններով դիրքեր զբաղեցնելով: Երկաթով հարուստ սիլիցիդների առկայությունը մագնիսական հատկություններ է հաղորդում ստացված MAX-ֆազին:

Հետազոտության արդյունքները հիմք են հանդիսանում հետևյալ եզրակացության համար. ԲԻՍ-ը հեռանկարային և ծախսարդյունավետ մեթոդ է MAX-ֆազերի սինթեզի համար՝ բարձր ելքով և էներգիայի նվազագույն ծախսերով: Ստացված MAX-ֆազերն ունեն անհրաժեշտ ֆիզիկաքիմիական հատկություններ, ինչը նրանց հեռանկարային է դարձնում տարբեր ոլորտներում օգտագործելու համար, ներառյալ բարձրջերմաստիճանային ծածկույթները, էլեկտրոնիկական և օդատիեզերական արդյունաբերությունը: Հետագա հետազոտության ուղղությունները կարող են լինել բաղադրության և սինթեզի պայմանների օպտիմալացումը՝ նյութի էլքի բնութագրերը բարելավելու համար, ինչպես նաև տարրերի այլ համակցությունների ուսումնասիրությունը՝ կիրառելի MAX-ֆազերի շրջանակն ընդլայնելու համար:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Jeitschko W., & Nowotny H.** Carbides of Transition Metals with Nitrides of Metals // Journal of Solid State Chemistry.- 1971.- 5(2).-P. 79–93.
2. **Radovic M., & Barsoum M.W.** MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics // American Ceramic Society Bulletin.- 2013.- 92(3).- P. 20–27.
3. **Новиков А.С., Пайкин А.Г., Шулов В.А.** Получение свойства и перспективы применения MAX-материалов на основе титана // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2006. - №11. - С. 24.
4. **Barsoum M.W.** The  $\text{Mn}+1\text{AX}_n$  Phases: A New Class of Solids // Progress in Solid State Chemistry.- 2000.- 28(1...4).- P. 201–281. [https://doi.org/10.1016/S0079-6786\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6786(00)00006-6)

5. **Мержанов А.Г.** Процессы горения и синтез материалов.- Черноголовка: ИСМ-АН, 1998. - 512 с.
6. **Федотов А.Ф., Амосов А.П., Радченко В.П.** Моделирование процесса прессования порошковых материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.- М.: Машиностроение-1, 2005.- С. 258-281. - ISBN 5-94275-185-4
7. **Мержанов А.Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика.- Черноголовка: Территория, 2001. - 432 с.
8. **Zhang J., Zhou Y., & Sun Z.** The Formation of MAX Phases // Materials Science and Engineering A.- 2009.- 500(1-2).- P. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.024>
9. **Сметкин А.А., Каченюк М.Н.** Механосинтез и характеристики порошковых композиций Ti-Si и Ti-SiC-C // Керамика и композиционные материалы: Тез. докл. V Всерос. конф. - Сыктывкар, 2004. - С. 115.
10. **Ревенко А.Г.** Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1994. - 264 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 08.10.2024:

**С.Г. АГБАЛЯН, Н.Г. СААКЯН, М.Е. САСУНЦЯН**

#### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ МАХ-ФАЗ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ**

МАХ-фазы ( $Mn+1AX_n$ , где М – переходный металл, А – элемент основной группы, X – углерод или азот,  $n=1...3$ ) обладают уникальными физико-механическими свойствами, такими как высокая прочность, вязкость, термическая стабильность и электромагнитные характеристики. Спрос на эти материалы очень высок, особенно в микроэлектронике. Однако проблема массового производства МАХ-фаз до сих пор остается нерешенной и актуальной.

В работе проанализированы существующие методы получения МАХ-фазы, в том числе пирометаллургический метод получения МАХ-фазовых композиционных материалов, методы спекания пористых прессованных образцов, химического осаждения из газовой фазы, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), керамический метод получения МАХ-фазовых композитов. В результате предложены выбор и обоснование оптимальной технологической схемы для дальнейшей реализации.

Изучен процесс получения МАХ-фазы, содержащей железо и кремний, методом СВС. Проведен рентгеноструктурный, рентгеноспектральный и морфологический анализ полученных образцов. Показано, что метод СВС особенно эффективен при получении МАХ-фазы с высоким выходом и минимальными энергетическими затратами. Полученные образцы имеют плотную кристаллическую структуру и однородное фазовое распределение, что делает их перспективными для получения высокотемпературных покрытий, использования в электронике и других областях. Рассмотрены перспективы дальнейших исследований по оптимизации условий синтеза и расширению сочетаний используемых элементов.

Для получения МАХ-фазы были выбраны оптимальные условия синтеза по формуле  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ . Показано, что методом СВС получена порошковая смесь из порошков ферросилиция, титана, алюминия и углерода, в которой содержание МАХ-фазы составило 93% по массе, где содержание богатых железом фаз  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и  $\text{FeSi}$  придает основной массе ферромагнитные свойства. Массовое содержание нерастворимой смеси составляет 7% (5%  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  и 2 %  $\text{TiC}$ ). Полученная микроструктура МАХ-фазы имеет слоистый вид и обладает ферромагнитными свойствами.

**Ключевые слова:** МАХ-фазы, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металлические порошки, порошковая металлургия, спекание, кристаллическая структура, фазовые превращения.

**S.G. AGHBALYAN, N.G. SAHAKYAN, M.E. SASUNTSYAN**

#### **ANALYSIS OF METHODS FOR OBTAINING MAX-PHASES AND DEVELOPING AN OPTIMAL TECHNOLOGICAL SCHEME**

MAX phases ( $\text{Mn}+1\text{AX}_n$ , where M is a transition metal, A is a main group element, X is carbon or nitrogen, and  $n=1\dots3$ ) possess unique physicochemical properties, such as high strength, toughness, thermal stability, and electromagnetic characteristics. The demand for these materials is particularly high in microelectronics. However, mass production of MAX phases remains an unresolved and relevant issue.

This paper analyzes the existing methods for producing MAX phases, including the pyrometallurgical method for obtaining MAX phase composite materials, sintering of porous pressed samples, chemical vapor deposition (CVD), self-propagating high-temperature synthesis (SHS), and the ceramic method for producing MAX phase composites.

As a result, an optimal technological scheme has been proposed and justified for further implementation. The study focuses on the process of obtaining a MAX phase containing iron and silicon via the SHS method. X-ray structural, X-ray spectral, and morphological analyses of the obtained samples are conducted. It is shown that the SHS method is particularly effective for producing a MAX phase with high yield and minimal energy costs. The samples obtained have a dense crystalline structure and uniform phase distribution, making them promising for high-temperature coatings, applications in electronics, and other fields. Future research prospects for optimizing the synthesis conditions and expanding the combinations of elements used are also discussed.

Optimal synthesis conditions were selected for obtaining the MAX phase according to the formula  $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ . It was demonstrated that using the SHS method, a powder mixture of ferrosilicon, titanium, aluminum, and carbon was obtained, in which the content of the MAX phase was 93% by mass, with iron-rich phases such as  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , and  $\text{FeSi}$  imparting ferromagnetic properties to the main mass. The mass content of the insoluble mixture is 7% (5%  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  and 2%  $\text{TiC}$ ). The microstructure of the obtained MAX phase exhibits a layered appearance and possesses ferromagnetic properties.

**Keywords:** MAX phase, self-propagating high-temperature synthesis, metal powders, powder metallurgy, sintering, crystalline structure, phase transformations.

К.Г. ДАВИТЯН, С.А. АРУТЮНЯН, А.К. ДАВИДЯН, Т.Г. ПАСКЕВИЧЯН,  
А.Р. АКОПЯН

### ПОЛУЧЕНИЕ МОЛИБДАТА КАЛЬЦИЯ ИЗ СТАНДАРТНЫХ МОЛИБДЕНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Проведены исследования и разработана технологическая схема получения молибдата кальция из стандартных молибденовых концентратов, производимых из местного рудного сырья предприятиями горнометаллургического комплекса Республики Армения. Схема включает: низкотемпературную прокатку концентратов, выщелачивание полупрокаленных концентратов разбавленной соляной кислотой, осаждение меди, железа и осаждение молибдата кальция из полученных растворов молибдатом натрия и хлоридом кальция. В результате переработки стандартных молибденовых концентратов могут быть получены очищенные от примесей молибдат кальция, а также триоксид молибдена и аммоний молибденовоокислый технической чистоты. После осаждения молибдата кальция металлический молибден также может извлекаться из маточного раствора (1,2 г/л Мо) методом сорбции-десорбции на ионообменной смоле марки ЭДЭ-10П.

**Ключевые слова:** молибденовый концентрат, прокатка, осаждение, молибдат кальция, триоксид молибдена, аммоний молибденовоокислый.

**Введение.** Благодаря уникальному сочетанию термической стабильности и химической стойкости молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$  считается ценным в ряде научных и промышленных изобретений [1]. Одно из наиболее известных применений молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  - оптические и люминесцентные материалы [2]. Его используют: в ядерной физике в сцинтилляционных детекторах в качестве среды для обнаружения ионизирующего излучения [3]; в качестве пигмента и, в отличие от некоторых других соединений молибдена и токсичных хроматов, считается экологически чистой альтернативой, имеет антикоррозионные применения [4]; в керамике и стекле в качестве добавки для улучшения цвета, непрозрачности или термических свойств; в сталеплавильном процессе в качестве лигатурной альтернативы ферромолибдену  $\text{MoFe}$ , в производстве низколегированных сталей для обогащения их молибденом, повышая прочность и жаростойкость таких сталей [5,6].

Существуют различные методы синтеза молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , такие как гидротермальный [6, 7], микроволновый [8, 9], электрохимический [10, 11], соосаждение [12, 13] и др. Однако традиционные методы синтеза

молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  требуют использования высокочистого сырья и сложных условий реакций синтеза, что приводит к высоким энергозатратам и ограничивает масштабы процесса. Использование чистого сырья и дорогостоящих реагентов также увеличивает стоимость переработки, что ограничивает применимость того или иного метода.

Кристаллическая структура молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  представлена на рис. 1.

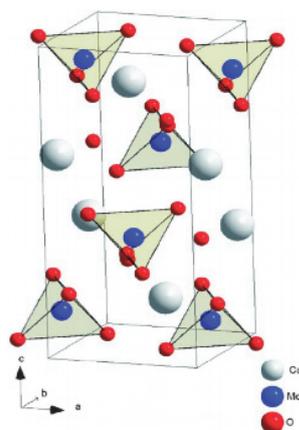
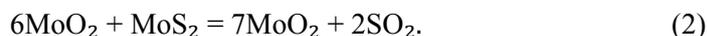


Рис. 1. Кристаллическая структура молибдата кальция [14]

**Постановка задачи и обоснование методики.** Исходя из вышеизложенного, в работе была поставлена задача разработать достаточно простой метод синтеза молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , который позволит преодолеть эти ограничения при использовании местного сырья. В связи с этим в качестве сырья для синтеза методом соосаждения был использован стандартный молибденовый концентрат, который соответствовал марке КМФ-4 и производится из местного сырья отечественными предприятиями горнометаллургического комплекса Армении. Совокупность решения вопросов поставленной задачи должна была обеспечить устойчивую экономическую эффективность, являться необходимой для защиты окружающей среды, стать основой крупномасштабного производства материалов на основе молибдена.

В процессе предварительного низкотемпературного обжига (прокалки) молибденового концентрата в среде воздуха и водяного пара (используемого в качестве регулятора температуры), который проводили при температурах  $400 \dots 550^\circ\text{C}$  в течение  $2 \dots 3$  часов, тяжёлые сульфиды цветных металлов образуют сульфаты и оксиды, хорошо растворимые в разбавленной соляной кислоте  $\text{HCl}$ , при этом сульфаты молибдена окисляются до нерастворимых низших оксидов.

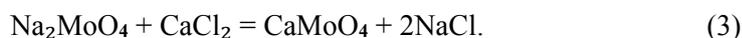
Происходит ряд химических реакций:



В полуобожженном молибденовом концентрате молибден находится преимущественно в форме  $\text{MoS}_2$  и  $\text{MoO}_2$ , а медь – в виде сульфатов и оксидов.

Учитывая, что сульфаты цветных металлов, оксиды кальция и магния хорошо растворимы в растворе разбавленной соляной кислоты, а сульфид молибдена и низшие оксиды практически нерастворимы в этом растворе, полуобожженный молибденовый концентрат подвергали выщелачиванию раствором разбавленной соляной кислоты. Выщелачивание проводили при комнатной температуре в течение 1...3 часов. После выщелачивания сусло фильтровали, а осадок промывали водой до прозрачности промывных вод. Для очистки раствора от примесей меди и железа его нейтрализовали содой до pH 7...8, раствор кипятили, при этом избыток соды разлагался (удаляется  $\text{CO}_2$ ), комплекс карбоната меди также разлагался, а железо коагулировало. После высушивания осадка определяли количество железа и меди.

Образование молибдата кальция сопровождается следующей реакцией:



После нейтрализации и фильтрации раствора, содержащего 25...50 г/л молибдена, хлоридом кальция  $\text{CaCl}_2$  осаждался молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$ . Хлорид кальция  $\text{CaCl}_2$  добавлялся несколько раз тонкой струйкой, что обеспечивало высокую степень осаждения молибдена.

Осаждение молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  проводили при pH 7,5...8,5 в течение 3 часов, температуре 85...95°C при интенсивном перемешивании.

Осаждение считали законченным, когда расчетное количество молибдена в маточном растворе не превышало 1,2...1,3 г/л. Полученный молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$  промывали 4...5 раз холодной водой и высушивали. Из маточных растворов, полученных при осаждении молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , металлический молибден извлекали на ионообменных смолах методами сорбции и десорбции.

Полученный молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$  был подвергнут рентгеноструктурному анализу с использованием многофункциональной рентгеновской дифракционной системы Smart Lab SE Rigaku, оснащенной 2D-детектором XSPA-400 ER.

На рис. 2 представлена рентгенограмма, из которой следует, что полученный материал полностью соответствует требованиям стандарта на  $\text{CaMoO}_4$ .

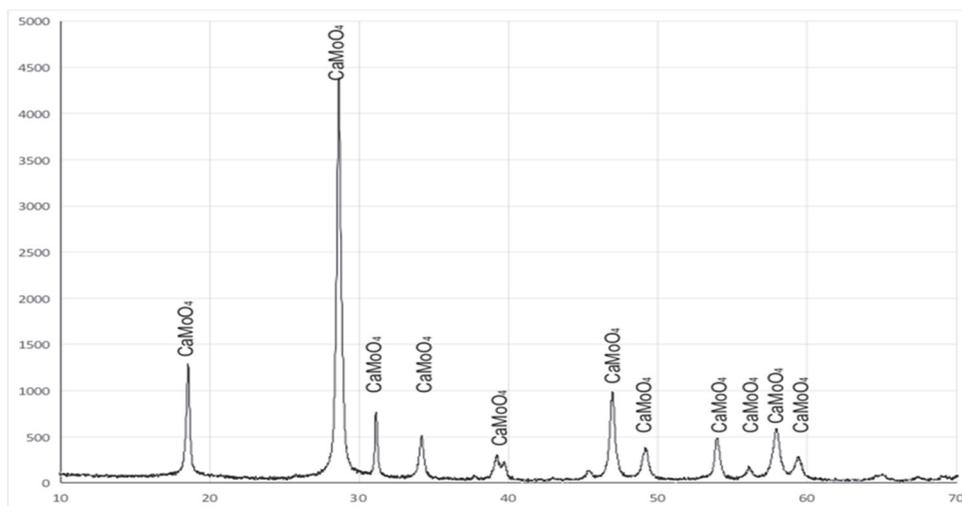


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$

По результатам проведенных исследований, анализа полученных результатов, проверки технологических операций в опытно-экспериментальных условиях была разработана технологическая схема переработки стандартных молибденовых концентратов из местного сырья для получения очищенного от примесей молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , а при необходимости производственных задач также триоксида молибдена  $\text{MoO}_3$  и парамолибдата аммония  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  технической чистоты, которая приводится на рис. 3.

**Заключение.** Стандартный молибденовый концентрат марки КМФ-4 подвергли предварительному обжигу (прокалке). Очистку от примесей проводили выщелачиванием разбавленным раствором соляной кислоты и нейтрализацией содой.

Молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$  синтезировали осаждением из полученного раствора молибдата натрия  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  и хлорида кальция  $\text{CaCl}_2$ . Подобраны оптимальные режимы осаждения молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$ , при которых конверсия достигала 95%.

После осаждения молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  металлический  $\text{Mo}$  извлекали из маточного раствора (1,2 г/л  $\text{Mo}$ ) на ионообменной смоле ЭДЭ-10П. Десорбцию молибдена  $\text{Mo}$  проводили раствором  $\text{NH}_4\text{Cl}$  концентрацией 1...2 моль/л.

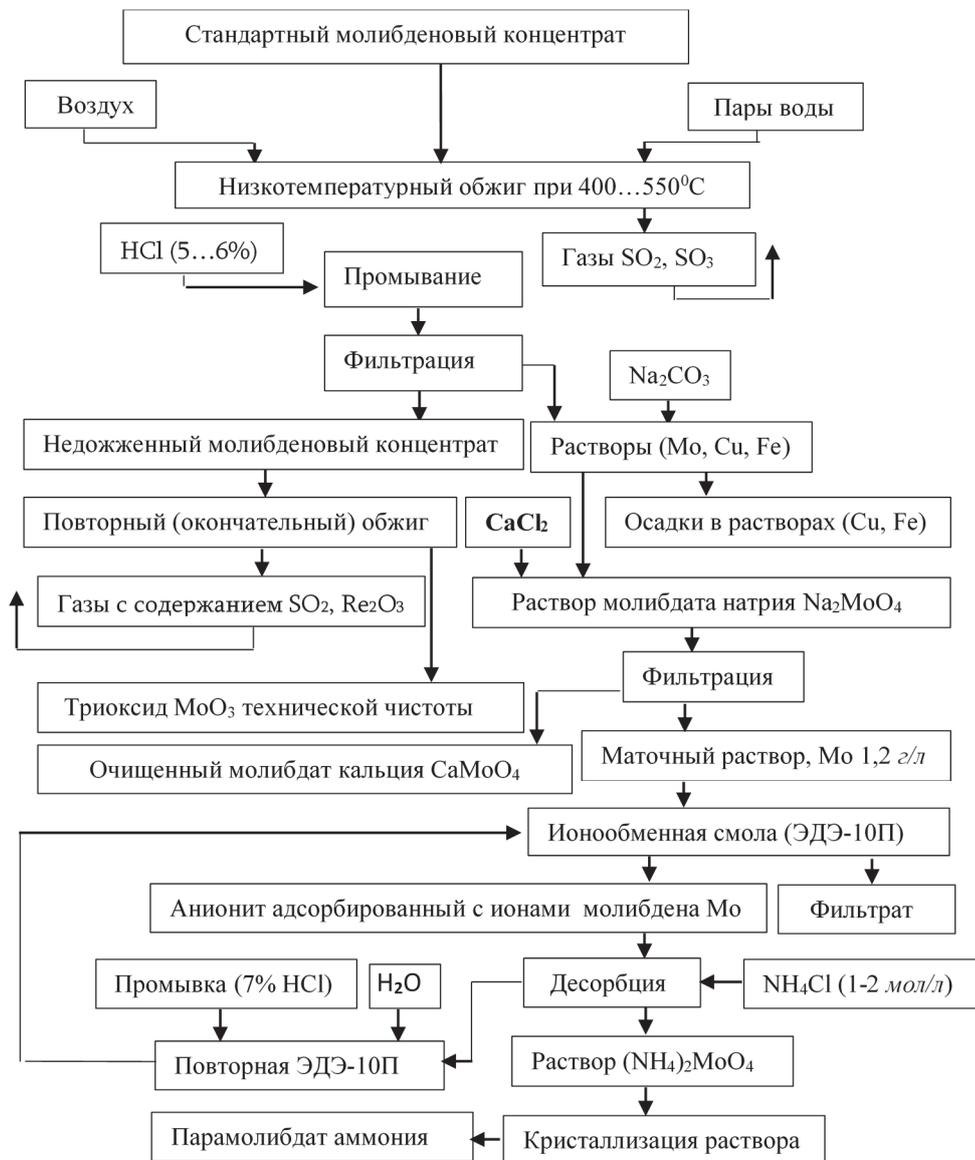


Рис. 3. Технологическая схема производства очищенного молибдата кальция  $\text{CaMoO}_4$  (и технически чистых  $\text{MoO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) из молибденовых концентратов, полученных из руд армянских медно-молибденовых месторождений

Разработанная технологическая схема переработки стандартных молибденовых концентратов из местного сырья позволяет получать очищенный от примесей молибдат кальция  $\text{CaMoO}_4$  для потребления металлургическим комплексом внутри Армении и экспортных поставок за рубеж.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermal properties of CaMoO<sub>4</sub>: Lattice dynamics and synchrotron powder diffraction studies / **A. Senyshyn, H. Kraus, V.B. Mikhailik, et al** // Physical Review Journals.- 2006.- B 73 (1), January 11.
2. High-pressure dielectric behavior of polycrystalline CaMoO<sub>4</sub>: The role of grain boundaries / **T. Qin, Q. Wang, D. Yue, W. Shen, et al** // J. Alloys Compd.- 2018.- 730.- P.1-6.
3. Excitation density effects in luminescence properties of CaMoO<sub>4</sub> and ZnMoO<sub>4</sub> / **D. Spassky, A. Vasilev, A. Belsky, N. Fedorov, et al** // Opt. Mater.- 2019.- 90.- P. 7-13.
4. A cryogenic setup for multifunctional characterization of luminescence and scintillation properties of single crystals / **I.R. Pandey, J. Cheon, D.J. Daniel, M. Kim et al** // Rev. Sci. Instrum.- 2020.- 91.- P.103-108.
5. Calcium molybdate: Toxicity and genotoxicity assay in *Drosophila melanogaster* by SMART test / **F.X. Nobre, R. Muniz, F. Martins, et al** // J. Mol. Struct.- 2020.- 1200.
6. **Зеликман А.Н.** Молибден.- М.: Металлургия, 1970.- 439с.
7. **Bhagwan J., Hussain S.K., Yu J.S.** Facile hydrothermal synthesis and electrochemical properties of CaMoO<sub>4</sub> nanoparticles for aqueous asymmetric supercapacitors //ACS Sustain. Chem. Eng.- 2019.- 7.- P. 12340-12350.
8. Synthesis of CaMoO<sub>4</sub> microspheres with enhanced sonocatalytic performance for the removal of Acid Orange 7 in the aqueous environment / **L.L. He, Y. Zhu, Q. Qi, X.Y. Li, et al** // Sep. Purif. Technol.- 2021.- 276.
9. Microwave-assisted synthesis of Ca<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>MoO<sub>4</sub> (x=0, 0.2, 0.7 and 1) and its application in artificial photosynthesis / **R.C.D.S. Junior, A.E. Nogueira, A.S. Giroto, J.A. Torres, et al** // Ceram. Int.- 2021.- 47.- P. 5388-5398.
10. **Phuruangrat A., Thongtem S., Thongtem T.** Effect of Ce dopant on photocatalytic properties of CaMoO<sub>4</sub> nanoparticles prepared by microwave- assisted method // Mater. Res. Innov.- 2022.- 26.- P. 84-90.
11. **Chen L.P.** Evolution of surface morphologies of CaMoO<sub>4</sub> films and their luminescent properties // Rare Metals.- 2022.- 41.- P. 2789-2793.
12. Preparation and microstructure of CaMoO<sub>4</sub> ceramic films prepared through electrochemical technique / **P. Yu, J. Bi, D.Q. Xiao, L.P. Chen, et al** // J. Electroceram.- 2006.- 16.- P. 473.
13. **Jung J.Y.** Fabricated flexible composite for a UV-LED color filter and anti-counterfeiting application of calcium molybdate phosphor synthesized at room temperature // Materials.- 2022.- 15.- P. 2078.
14. Experimental and theoretical study to explain the morphology of CaMoO<sub>4</sub> crystals / **F.K.F Oliveira, M.C. Oliveira, L. Gracia, R.L. Tranquilin, et al** // J. Phys. Chem. Solids.- 2018.- 114.- P. 141-152.

Институт общей и неорганической химии РАН. Материал поступил в редакцию 03.09.2025:

Կ.Հ. ԴԱՎԻԹՅԱՆ, Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ա.Կ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ,  
Տ.Գ. ՊԱՍԿԵՎԻՉՅԱՆ, Ա.Ռ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

**ՍՏԱՆԴԱՐՏ ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ԽՏԱՆՑՈՒԹԵՐԻՑ ԿԱԼՑԻՈՒՄԻ ՍՈԼԻԲԴՍԻ  
ՍՏԱՑՈՒՄԸ**

Կատարվել են հետազոտություններ, և մշակվել է տեխնոլոգիական հոսքագիծ՝ կալցիումի մոլիբդատ ստանալու համար ստանդարտ մոլիբդենի խտանյութերից, որոնք արտադրվում են տեղական հանքային հումքից ՀՀ լեռնամետալուրգիական համալիրի ձեռնարկություններում և ներառում են՝ խտանյութերի ցածր ջերմաստիճանային կալցինացում, կիսակալցինացված խտանյութերի լվացում նոսր աղաթթվով, պղնձի, երկաթի նստեցում և ստացված լուծույթներից կալցիումի մոլիբդատի նստեցում նատրիումի մոլիբդատով և կալցիումի քլորիդով: Ստանդարտ մոլիբդենի խտանյութերի մշակման արդյունքում կարելի է ստանալ խառնուրդներից մաքրված կալցիումի մոլիբդատ, ինչպես նաև տեխնիկական մաքրությամբ մոլիբդենի եռօքսիդ և ամոնիումի մոլիբդատ: Կալցիումի մոլիբդատի նստեցումից հետո մետաղական մոլիբդենը կարող է նաև արդյունահանվել մայրական լուծույթից (1,2 գ/Մո) ՉՃԸ-10Ս ապրանքանիշի իոնափոխանակային խեժի վրա սորբման-ապասորբման մեթոդով:

**Առանցքային բառեր.** մոլիբդենի խտանյութ, կալցինացում, նստեցում, կալցիումի մոլիբդատ, մոլիբդենի եռօքսիդ, ամոնիումի մոլիբդատ:

**K.G. DAVITYAN, S.A. HARUTYUNYAN, A.K. DAVIDYAN,  
T.G. PASKEVICHYAN, A.R. HAKOBYAN**

**OBTAINING CALCIUM MOLYBDATE FROM STANDARD MOLYBDENUM  
CONCENTRATES**

Research has been conducted, and a technological scheme has been developed for obtaining calcium molybdate from standard molybdenum concentrates, which are produced from local ore raw materials by enterprises of the mining and metallurgical complex of Republic of Armenia. The scheme includes: low-temperature roasting of concentrates, leaching of semi-roasted concentrates with diluted hydrochloric acid, precipitation of copper and iron, and precipitation of calcium molybdate from the resulting solutions with sodium molybdate and calcium chloride. As a result of processing standard molybdenum concentrates, calcium molybdate purified from impurities, as well as molybdenum trioxide and ammonium molybdate of technical purity can be obtained. After the precipitation of calcium molybdate, metallic molybdenum can also be extracted from the mother liquor (1,2 g/l Mo) by sorption-desorption on ՉՃԸ-10Ս ion exchange resin.

**Keywords:** molybdenum concentrate, calcination, precipitation, calcium molybdate, molybdenum trioxide, ammonium molybdate.

Լ.Ս. ՄԱԻԼՅԱՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՓՈՔԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԶԱՌԻԹԱՓ ՀԱՆՔԱՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ  
ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՄՇԱԿՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ,  
ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՄԱՆ ԵՎ ՆՈՐԵՐԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ  
ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ

Հայաստանի Հանրապետության մի շարք գունավոր և ազնիվ մետաղների, այդ թվում՝ Տերտերասարի և Բարձրադիրի ոսկու, Թունդիրի ոսկի-պղնձի, Ալավերդու և Կապանի պղնձի ու այլ հանքավայրեր բնութագրվում են համեմատաբար հարուստ, սակայն փոքր քանակի պաշարներով, գերազանցապես չափազանց բարակ և բարակ գառիթափ հանքամարմիններով՝ արտահայտված ոչ հազվադեպ բարդ ձևաբանությամբ, փոփոխական հզորությամբ, տարածման երկարությամբ և անկման խորությամբ, ինչպես նաև հաճախ անկայուն հանքաքարով և պարփակող ապարներով:

Վերոհիշյալ բնական պայմաններում ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրության, զարգացման, կատարելագործման և նորերի ստեղծման բնագավառում ՀՀ-ում՝ Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Լեռնային գործ և շրջակա միջավայրի պահպանություն» ամբիոնում իրականացված հետազոտությունները վկայում են խնդրի կարևորության մասին:

Բերվել են Մեղրաձորի ոսկու, Ալավերդու պղնձի և Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային հանքավայրի չափազանց բարակ և բարակ գառիթափ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրության, զարգացման և նորերի ստեղծման օրինակներ, որոնք ուղղված են մաքրման տարածության լայնության կրճատմանը, հանությային տարածության լցափակման օգտագործման և հանքաքարի անջատ հանույթի իրագործմանը: Վերջիններս հանգեցնում են, մի կողմից՝ հանքաքարի արդյունահանման որոշ ծախսերի ավելացմանը և, մյուս կողմից՝ ընդերքից հանքաքարի կորզման որակաքանակական ցուցանիշների բարձրացմանը:

**Առանցքային բառեր.** հանքային մարմին, ոսկի, հանքաքար, մշակման համակարգ, հզորություն, պարունակություն:

**Ներածություն:** Ցանկացած հանքավայր ներկայացված է մեկ կամ մի քանի հանքամարմիններով, որոնց կամ դրանց առանձին մասերի մշակման նպատակով տնտեսապես նպատակահարմար (օպտիմալ) համակարգի ընտրության հիմնավորումը չափազանց բարդ լեռնատնտեսական խնդիր է. անհրաժեշտ է կատարել տեխնիկապես կիրառելի մի քանի մշակման համակարգերից մեկի՝ տնտեսապես առավել նպատակահարմարի (օպտիմալի) ընտրություն:

Հանքաքարի ստորգետնյա արդյունահանման ինքնարժեքի 40...60% բաժին է ընկնում մշակման համակարգին, և վերջինից են կախված հանքաքարի կորզման որակաքանակական ցուցանիշները, ինչպես նաև օգտակար բաղադրիչի նվազագույն թույլատրելի սահմանաքանակները՝ մետաղի եզրագծային, նվազագույն արդյունաբերական և այլ պարունակությունները:

Մշակման համակարգի ընտրման վրա ազդող կարևոր լեռնաերկրաբանական գործոններից է հանքամարմնի հզորությունը, որից զգալիորեն կախված են հանքաքարի մաքրահանման եղանակի ընտրությունն ու արդյունավետությունը: Մետաղական հանքամարմնի կամ դրա առանձին մասի հզորության կտրուկ փոփոխությունը դժվարացնում է դրանց մշակումը: Ջառիթափ հանքամարմինների դեպքում մաքրման տարածության լայնությունը կախված է հզորությունից, իսկ սակավաթեք հանքամարմինների դեպքում մաքրման տարածության բարձրությունն է կախված հզորությունից:

Հանքամարմինները՝ ըստ հզորության, ստորաբաժանվում են հինգ խմբի [1].

– չափազանց բարակ հանքամարմիններ. հզորությունը կազմում է մինչև 0,6 *ւ*,

– բարակ հանքամարմիններ. հզորությունը կազմում է 0,7...2,0 *ւ*,

– միջին հզորության հանքամարմիններ. հզորությունը կազմում է 2,0...5,0 *ւ*,

– հզոր հանքամարմիններ. հզորությունը կազմում է 5,0...20,0 *ւ* :

– գերհզոր հանքամարմիններ. հզորությունը կազմում է 20,0 *ւ*-ից ավելի:

Հանքամարմնի կամ դրա առանձին մասի հզորությունը ազդեցություն ունի մշակման համակարգերի վրա:

Չափազանց բարակ հանքամարմնի կամ դրա առանձին մասի մինչև 0.6...0.8 *ւ* հզորության դեպքում կիրառելի են գրեթե բոլոր մշակման համակարգերը, բացառությամբ հանքաքարի և պարփակող ապարների փլուզմամբ ու համակցված մշակման համակարգերի:

Հանքամարմնի հզորության նշված տիրույթում կիրառելի մշակման համակարգերը պահանջում են պարփակող կողային ապարների հետ միասին հանքաքարի համախառն հանույթ կամ էլ պարփակող կողային ապարներից առանձին հանքաքարի անջատ հանույթ:

Համախառն հանույթով մշակման համակարգերի դեպքում որքան փոքր է հանքամարմնի հզորությունը, այնքան մեծ է մաքրման տարածության լայնությունը ձևավորող պոկման ենթակա կողային պարփակող ապարների հաստությունը և, հետևաբար, հանքաքարի աղքատացումը: Ակնհայտ է, որ համախառն հանույթով մշակման համակարգերի դեպքում տեխնոլոգիական գործընթացների իրականացման տեխնիկական հնարավորությունը սահմանափակվում է ոչ թե հանքերակի հզորությամբ, այլ մաքրման տարածության լայնությամբ [2]:

Այդ իմաստով առաստաղաաստիճանային մշակման համակարգերի դեպքում մաքրման տարածության լայնությունը պետք է լինի նվազագույնը 0,6...0,8 *ւ*,

իսկ պահեստից հանքաքարի պայթանցքային պոկմամբ մշակման համակարգերի դեպքում՝ 1,1...1,2 մ-ից ոչ պակաս (պահեստավորված հանքաքարի խցանումները բացառելու համար):

Հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգերի դեպքում մաքրման տարածության նվազագույն լայնությունը պայմանավորված է հանքաքարի առբերման համար օգտագործվող ամենափոքր քերաշերտի լայնությամբ՝ մոտավորապես 1,5 մ:

Շերտային փլուզմամբ մշակման համակարգերի դեպքում մաքրման մուտքափորվածքի նվազագույն լայնությունը կազմում է 3,0 մ, քանի որ այդ չափի միջշերտային երեսարկն ապահովում է առանց կախումների իջեցումը:

Ինչ վերաբերում է հանքաքարի անջատ հանույթ թույլատրող մշակման համակարգերին, ապա այստեղ հանութային ճեղքի լայնությունը ձևավորվում է հանքամարմնի հզորությունից և հորատապայթեցման ժամանակ անխուսափելի պոկվող կողային ապարների հաստությունից (նվազագույնը 0,1...0,2 մ): Գործնականում հանութային ճեղքի լայնության նվազագույն արժեքը կազմում է մոտավորապես 0,3...0,4 մ:

Վերը նշված տեխնիկական սահմանափակումները գործում են նաև բարակ հանքամարմինների դեպքում: Մասնավորապես, տեխնիկապես անհնար է իրականացնել փլուզված պարփակող ապարների տակ փլուզված հանքաքարի արտաթողում: Հետևաբար՝ կիրառելի չեն հանքաքարի և պարփակող ապարների փլուզմամբ մշակման բոլոր համակարգերը:

Հանքամարմնի կամ դրա առանձին մասի 1,5 մ-ից մեծ հզորության դեպքում բաց մաքրման տարածությամբ մշակման համակարգերը պահանջում են ժամանակավոր կամ մշտական թողնվող բնամասերով կամ էլ արհեստական (փայտե և բետոնե) հենարաններով հանութային տարածության պահպանում:

Ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրության, զարգացման, կատարելագործման և նորերի ստեղծման բնագավառում գիտատեխնիկական առաջընթացի գլխավոր ուղղություն, որպես կանոն, դիտարկվում է հանքաքարի արդյունահանման տեխնոլոգիական գործընթացների մեքենայացումը [1]:

**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրության, զարգացման, կատարելագործման և նորերի ստեղծման բնագավառում Հայաստանում իրականացված հետազոտությունները վկայում են խնդրի կարևորության մասին, որը պայմանավորված է հանրապետության գունավոր և ազնիվ մետաղների հանքավայրերի առանձնահատկություններով, դրանք են՝ հանքաքարերի համեմատաբար ոչ մեծ պաշարները, ոչ հազվադեպ բարդ ձևաբանությունը, փոփոխական հզորությունը (արտահայտված նեղացումներով և փքվածքներով), տարածման երկարությունը և անկման խորությունը, ինչպես նաև հաճախ անկայուն հանքաքարը և պարփակող ապարները:

Հայաստանում վերը նշված լեռնաերկրաբանական և լեռնատեխնիկական պայմաններով բնութագրվում են, մասնավորապես, Տերտերասարի և Բարձրադիրի ոսկու, Թունդիրի ոսկի-պղնձի, Ալավերդու և Կապանի պղնձի ու այլ հանքավայրերը:

*Տերտերասարի ոսկու հանքավայրը:* Հանքավայրում արդյունաբերական նշանակություն ունեն 2՝ Առաջին և Երրորդ քվարց-բազմամետաղային հանքերակները:

2003 թ.-ի դրությամբ Տերտերասարի ոսկու հանքավայրի հանքաքարի հաշվեկշռային պաշարները կազմում են 181080 տ՝ ոսկու 11,48 գ/տ, արծաթի 90,72 գ/տ, պղնձի 0,57% միջին պարունակություններով. հանքաքարի պաշարների 70% կուտակված են 0,7 մ հզորությամբ հանքամարմիններում կամ դրանց առանձին տեղամասերում:

*Բարձրադիրի ոսկու հանքավայրը:* Հանքավայրը ներկայացված է 5 հանքամարմիններով. 1, 1<sup>ա</sup>, 2, 3 և 4:

2008թ. դրությամբ Բարձրադիրի ոսկու հանքավայրի հանքաքարի հաշվեկշռային պաշարները կազմում են 917900 տ՝ ոսկու 10,51 գ/տ և արծաթի 15,70 գ/տ միջին պարունակություններով:

*Թունդիրի ոսկու հանքավայրը:* Հանքավայրի սահմաններում հայտնաբերվել են 25 ոսկեբեր և 2 պղինձ-ոսկու հանքերակային գոտիներ:

Թունդիրի ոսկու հանքավայրի հանքաքարի պաշարները հաշվարկված են 51100 տ քանակով՝ ոսկու 13,6 գ/տ, արծաթի 29,5 գ/տ, պղնձի 0,6% միջին պարունակություններով: Հանքաքարը կուտակված է 1,0 մ հզորությունից փոքր հանքամարմիններում, այդ թվում՝ 40% կուտակված է 0,4 մ հզորությունից փոքր, 27%՝ 0,4 մ-ից մինչև 0,7 մ հզորությամբ և 33%՝ 0,7 մ-ից մինչև 1,0 մ հզորությամբ հանքամարմիններում:

*Ալավերդու պղնձի հանքավայրը:* Հանքավայրը ներկայացված է 37 զառիթափ հանքամարմիններից բաղկացած շերտախմբով:

2002 թ.-ի դրությամբ Ալավերդու հանքավայրի հանքաքարի հաշվեկշռային պաշարները կազմում են 1180690 տ՝ պղնձի 5,33% միջին պարունակությամբ, որտեղ հանքաքարի մոտավորապես 70% բաժին է ընկնում չափազանց բարակ՝ մինչև 0,7 մ հզորությամբ հանքամարմիններին կամ դրանց առանձին տեղամասերին:

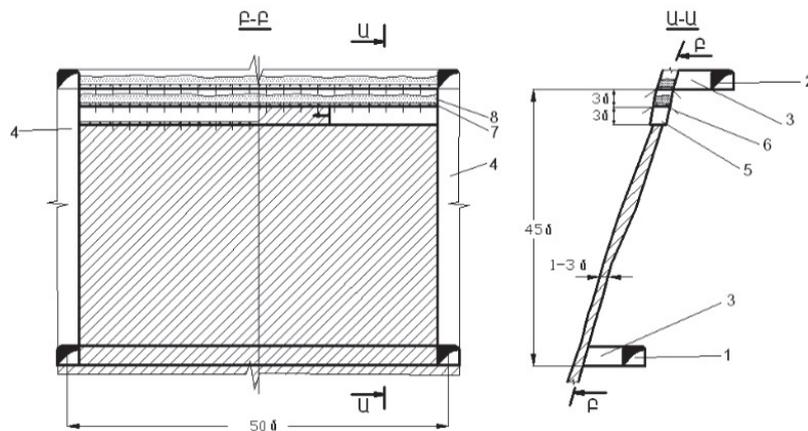
*Կապանի պղնձի հանքավայրը:* Հանքավայրում հայտնի է հանքայնացման երկու ձևաբանական տեսակ՝ հանքերակային և շտոկվերկային, ինչպես նաև հանքայնացման երրորդ ձևաբանական տեսակը՝ հանքերակային գոտիները:

2008թ. դրությամբ Կապանի պղնձի հանքավայրի հանքաքարի պաշարների մնացորդը հաշվարկված է 2717900 տ՝ պղնձի 2,03% միջին պարունակությամբ: Հանքաքարի պաշարների մոտավորապես 11% կենտրոնացված է 0,8 մ-ից փոքր, իսկ 89%՝ 0,8 մ-ից մեծ հզորություն ունեցող հանքամարմիններում կամ դրանց առանձին տեղամասերում:

ՀՀ հանքավայրերի բնական պայմանների վերաբերյալ հավաքագրված տվյալները ցույց են տալիս, որ դրանց ընդհանրությանը բնորոշ է հանքաքարերի համեմատաբար հարուստ, սակայն փոքր քանակով պաշարների, ինչպես նաև գերազանցապես չափազանց բարակ և բարակ գառիթափ հանքամարմինների առկայությունը:

**Հետազոտության արդյունքները:** Ստորև ներկայացվում են դիտարկվող հարցի առնչությամբ Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Լեռնային գործ և շրջակա միջավայրի պահպանություն» ամբիոնում իրականացված հետազոտությունների արդյունքները, որոնք հիմք են հանդիսանում վերոհիշյալ բնական պայմաններն ունեցող հանքավայրերի արդյունաբերական յուրացման արդյունավետության բարձրացման ուղիների որոնման համար:

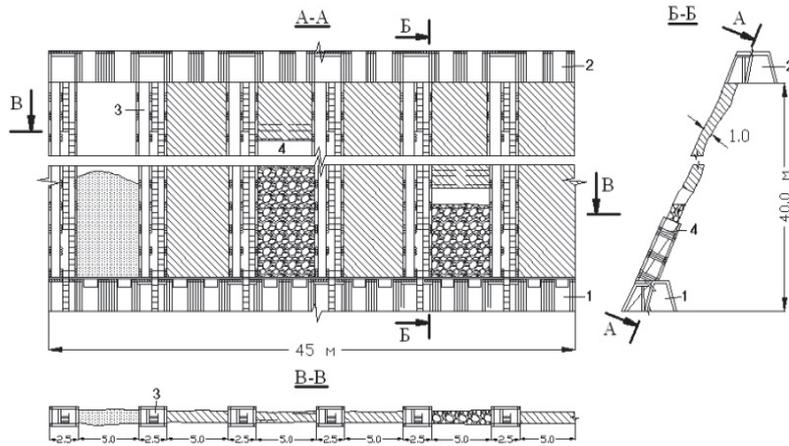
Ստեղծվել է վարընթաց շերտերի հանույթով, երկաթ - բետոնե սահմանագատող միջշերտային ծածկով մշակման համակարգը (նկ. 1) [3-5], որը թույլ է տալիս հրաժարվել ամրակապման շրջանակներից, պարզեցնել նախապատրաստական և կտրման աշխատանքները, ապահովել լեռնային աշխատանքների անվտանգությունն ու բարելավել արտադրական գործընթացների կատարման պայմանները, բարձրացնել հանքաքարի կորզման որակաքանակական ցուցանիշները:



Նկ. 1. Վարընթաց շերտերի հանույթով, միջշերտային սահմանագատող երկաթբետոնե երեսարկով և հանքաքարի քերաշերտի պային առբերմամբ մշակման համակարգը. 1 - բացատարման շտրեկ, 2 - օդափոխման շտրեկ, 3 - մուտքային փորվածքներ, 4 - հանքային վերընթաց, 5 - մաքրման փորվածք, 6 - մետաղաձողեր, 7 - երկաթբետոնե երեսարկ, 8 - չոր լցանյութ

[6] աշխատանքում ներկայացված է Մեդրաձորի ոսկու հանքավայրի բարդ լեռնաերկրաբանական և լեռնատեխնիկական պայմաններով փոքր՝ մինչև 1,5 մ հզորությամբ հանքամարմնի համար վերընթացներից հանքաքարի պայթանցքերով

պոկմամբ, պահեստավորմամբ և հանութային տարածության հետագա լցափակմամբ ստորգետնյա մշակման համակարգի ընտրության հիմնավորման արդյունքը (նկ. 2):



Նկ. 2. Վերընթացներից հանքաքարի պայթանցքերով պոկմամբ, պահեստավորմամբ և հանութային տարածության հետագա լցափակմամբ ստորգետնյա մշակման համակարգը.

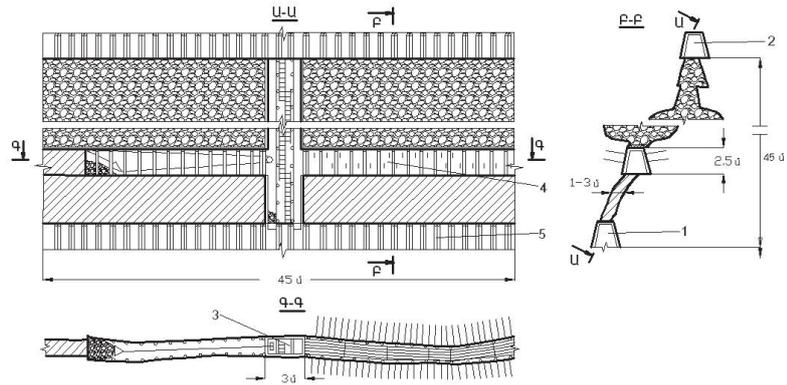
1 - բացատարման շտրեկ, 2 - օդափոխման շտրեկ, 3 - վերընթաց, 4 - հանութային տարածություն

Մշակման համակարգի հիմնական առավելություններն են փլուզումից պարփակող ապարների և երկրի մակերևույթի պահպանման հնարավորությունը, լեռնային աշխատանքների իրականացման անվտանգության բարձրացումը և հանքաքարի համեմատաբար փոքր աղքատացումը:

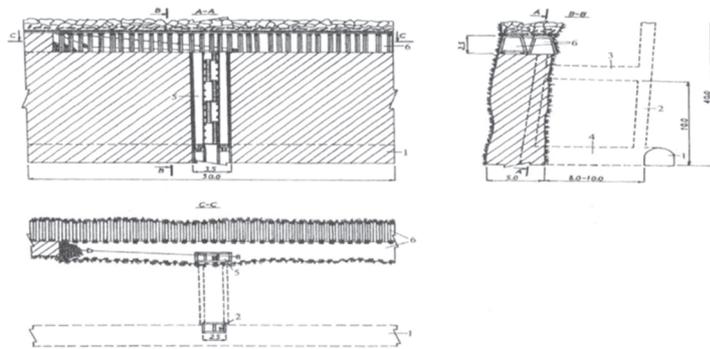
Հիմնական թերություններն են բլոկի բարդ և աշխատատար նախապատրաստումը, նախապատրաստական և կտրման աշխատանքների զգալի ծավալը և ամրակապման անտառանյութի համեմատաբար մեծ ծախսը, հանքամարմնի ոչ հաստատուն հզորության դեպքում հանքաքարի կորուստների մեծացումը, հանքաքարի անջատ հանությի և դրա հանքախորշային տեսակավորման կազմակերպման անհնարինությունը:

Փոքր հզորությամբ հանքամարմիններով ներկայացված մետաղական հանքավայրերի արդյունաբերական գնահատումն անհրաժեշտ է իրականացնել ըստ հանքամարմինների հզորության, որտեղ տեխնիկատնտեսական համեմատման են ենթարկվել անկայուն հանքաքարը և պարփակող ապարները՝ չափազանց բարակից մինչև միջին հզորությամբ զառիթափ հանքամարմինների դեպքում. երկու ստորգետնյա մշակման համակարգերը [7, 8]. I՝ վարընթաց շերտերի հանումով և պոկված կողային ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ (նկ. 3), II՝ շերտային փլուզմամբ (նկ. 4):

I մշակման համակարգի հիմնական առավելություններն են. փլուզումից երկրի մակերևույթի պահպանման, ընտրողական հանույթի կազմակերպման, փոփոխական հանքայնացմամբ և տեղադրման տարրերով հանքամարմինների մշակման և հուսալի երեսարկի դեպքում հանքաքարի փոքր կորուստների և աղքատացման հնարավորությունները:



Նկ. 3. Վարընթաց շերտերի հանումով և պոկված կողային ապարներով հանության տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգը. 1 - բացատարման շտրեկ, 2 - օղափոխման շտրեկ, 3 - բլոկային վերընթաց, 4 - մաքրման շերտային մուտքափորվածք, 5 - պահանգային ամրակապ



Նկ. 4. Շերտային փլուզմամբ մշակման համակարգը. 1 - բացատարման շտրեկ, 2 - օղափոխման շտրեկ, 3 - քվերշաղ-մուտք, 4 - բարձման մուտք, 5 - բլոկային վերընթաց, 6 - մուտքափորվածք

Հիմնական թերություններն են. մաքրման տարածություն ստորգետնյա ջրերի ներթափանցման հնարավորությունը, ամրակապման անտառանյութի և ՊՆ մեծ ծախսը, ամրակապման և մատի տեղադրման մեծ աշխատատարությունը, հանքախորշային բանվորի աշխատանքի ցածր արտադրողականությունը:

Շերտային փլուզմամբ մշակման համակարգի դիտարկվող տարբերակի հիմնական առավելություններն են՝ ընտրողական հանույթի և հանքախորշային տեսակավորման կազմակերպման հնարավորությունը, միջին հզորությամբ և հզոր հանքամարմինների մշակման դեպքում հանքաքարի փոքր կորուստների և ցածր աղքատացման ապահովումը:

Հիմնական թերություններն են՝ մեկից ոչ ավելի հարկերում շահագործական աշխատանքների իրականացման անհնարինությունը, պարփակող ապարների և երկրի մակերևույթի փլուզման, ինչպես նաև մաքրման տարածություն ջրերի ներթափացման հետևանքով շրջակա միջավայրի վիճակի խաթարումը, աշխատանքային պայմանների վատթարացումը և ջրերի հետ հանքային մանրունքի հեռացման արդյունքում օգտակար բաղադրիչի կորուստների ավելացումը, մաքրման հանքախորշերի օդափոխման վատ պայմանները, ինքնագնաց լեռնային սարքավորումների օգտագործման դժվարությունը, ամրակապման անտառանյութի մեծ ծախսը, կուտակվող փայտե մասի փտելու պատճառով հանքային մթնոլորտի աղտոտումը, հանքախորշային բանվորի աշխատանքի ցածր արտադրողականությունը:

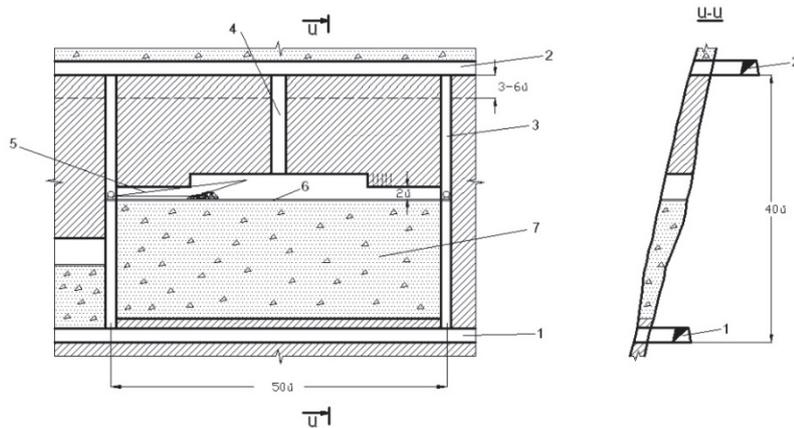
Արդյունքում հիմնավորվել է, որ, գործնականում, հանքամարմնի «կրիտիկական հզորությունը» կախված չէ հանքաքարային զանգվածում մետաղի պարունակությունից, և հանքամարմնի մինչև 1,75...1,89 *ւ*՝ հզորությունը տնտեսապես առավել նպատակահարմար է վարընթաց շերտերի հանումով և պոկված կողային ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ, իսկ հանքամարմնի նշված հզորությունից մեծ արժեքների դեպքում՝ շերտային փլուզման մշակման համակարգի կիրառումը:

[12] աշխատանքում ներկայացված է Ալավերդու պղնձի հանքավայրի չափազանց բարակ և բարակ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրությունը, որտեղ տեխնիկատնտեսական համեմատման են ենթարկվել հանքաքարի անջատ հանույթով և պոկված պարփակող ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ ու հանքաքարի համախառն հանույթով պահեստավորմամբ մշակման համակարգերը: Արդյունքում հիմնավորվել է, որ Ալավերդու պղնձի հանքավայրում հանքամարմնի մինչև 0,73 *ւ*-ը տնտեսապես առավել ձեռնտու են հանքաքարի անջատ հանույթով և պոկված պարփակող ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ, իսկ դրանից մեծ արժեքների դեպքում՝ հանքաքարի պահեստավորմամբ մշակման համակարգերը:

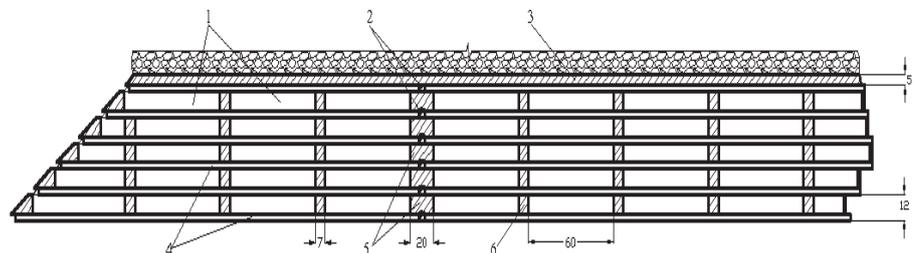
Համանման խնդրին են նվիրված [9-11] հոդվածները, որոնցում հեղինակները տեխնիկատնտեսական համեմատման են ենթարկել 3 մշակման համակարգեր. հանքաքարի անջատ հանույթով և պոկված պարփակող ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ (I), հանքաքարի ենթահարկային պոկմամբ՝

ճեղքային հանույթով (II) ու պահեստից հանքաքարի պոկմամբ (III) մշակման համակարգերը: Արդյունքում հիմնավորվել են, որ հանքամարմնի մինչև 0,49 մ հզորությունը օպտիմալ է I, 0,49 մ-ից մինչև 0,89 մ հզորությունը՝ II և 0,89 մ-ից մեծ արժեքները՝ III մշակման համակարգը:

[13] աշխատանքում, Հայաստանի գործող լեռնահարստացուցիչ կոմբինատի ստորգետնյա հանքի դեպքում, օգտակար բաղադրիչի «կրիտիկական պարունակություն» գնահատանքային ցուցանիշի միջոցով ընտրվել է օպտիմալ՝ հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգը (նկ. 5), որը ենթահարկային շտրեկներով մշակման համակարգի (նկ. 6) համեմատ, հանքաքարի կորուստների և աղքատացման կրճատման շնորհիվ, կարող է ապահովել տարեկան ավելի քան 11 \$ ԱՄՆ/տ շահույթի հավելում:

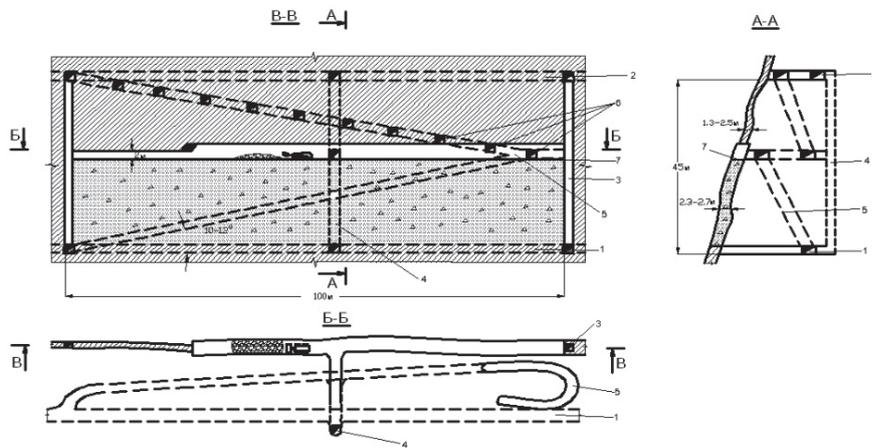


Նկ. 5. Հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգի տարբերակը՝ հանքաքարի քերաշերտիային առբերմամբ. 1 – բացատարման շտրեկ, 2 – օղափոխման-լցափակման շտրեկ, 3 – բլոկային վերընթաց, 4 – լցափակման վերընթաց, 5 – քերաշերտիային տեղակայանք, 6 – բետոնե երեսարկ, 7 – պնդացող լցանյութ



Նկ. 6. Ենթահարկային շտրեկներով մշակման համակարգը. 1 – խցեր, 2 – քվերշլագներ, 3 – առաստաղազանգված, 4 – ենթահարկային շտրեկներ, 5 – պահպանիչ բնամասեր, 6 – միջխցային բնամասեր

Ուշագրավ է քերաշերտիային տեղակայանքի և ինքնագնաց բարձող-առբերող մեքենայի միջոցով պոկված հանքաքարի առբերման գործընթացի կիրառման տիրույթների հիմնավորմանը նվիրված հետազոտությունը [14, 15], որտեղ տեխնիկատնտեսական համեմատման են ենթարկվել հորիզոնական շերտերի հանույթով և լցափակմամբ մշակման համակարգերի երկու տարբերակ. հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ՝ հանքաքարի քերաշերտիային առբերմամբ տարբերակը (նկ. 5), հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ՝ ինքնագնաց բարձող-առբերող մեքենայի կիրառմամբ տարբերակը (նկ. 7):



Նկ. 7. Հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգի՝ ինքնագնաց բարձող-առբերող մեքենայի կիրառմամբ տարբերակի գծապատկերը. 1 - բացատարման դաշտային շտրեկ, 2 - օդափոխման դաշտային շտրեկ, 3 - օդափոխման վերընթաց, 4 - բլոկային դաշտային հանքիջանցք, 5 - թեքատ, 6 - շերտային մուտքեր, 7 - երեսարկ

Արդյունքում ապացուցվել է, որ հանքամարմնի կամ դրա առանձին մասի մինչև 3 մ հզորության դեպքում օպտիմալ են հորիզոնական շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգի՝ հանքաքարի քերաշերտիային առբերմամբ, իսկ ավելի մեծ հզորությունների դեպքում՝ նույն մշակման համակարգի՝ ինքնագնաց բարձող-առբերող մեքենայի կիրառմամբ տարբերակները:

**Եզրակացություն.** Մեղրաձորի ոսկու, Ալավերդու պղնձի, Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային և այլ մետաղական հանքավայրերի փոքր հզորությամբ զառիթափ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման օպտիմալ համակարգերի ընտրությանը, կատարելագործմանը և նորերի ստեղծմանը նվիրված գիտահետազոտական աշխատանքների արդյունքների վերլուծությունը ցույց է տալիս հանքաքարի

մաքրահանման տեխնոլոգիական գործընթացներում փոքր զաբարիտային լեռնային սարքավորումների օգտագործմամբ հանութային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգերի կիրառման նպատակահարմարությունը, որոնք հանգեցնում են, մի կողմից՝ հանքաքարի արդյունահանման որոշ ծախսերի ավելացմանը և մյուս կողմից՝ հանքաքարի կորուստների ու աղբատացման կրճատմանը:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Հովհաննիսյան Ա.Հ.** Հանքաքարային հանքավայրերի ստորգետնյա մշակման արտադրական գործընթացներ: Դասագիրք / ՀԱՊՀ.- Եր.: Ճարտարագետ, 2011.- 200 էջ:
2. **Աղաբալյան Յու.Ա., Հովհաննիսյան Ա.Հ., Մուրադյան Հ.Խ.** Երակային հանքավայրերի յուրացման արդյունավետության բարձրացման հիմնական ուղիները // Էկոնոմիկա. – Երևան, 1996. – N10-12. – էջ 25–29:
3. Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր N335. Հանքամարմինների վարընթաց շերտային հանվածքի ծածկ / **Յու.Ա. Աղաբալյան, Ա.Հ. Հովհաննիսյան, Ա.Ն. Նաջարյան, Ա.Մ. Զաքարյան.**– Երևան, 1997:
4. **Агабян Ю.А., Оганесян А.Г.** Система разработки с нисходящей слоевой выемкой руды с железобетонным ограждающим межслоевым перекрытием // Горный журнал. – М., 1997. – N10. – С. 48-50.
5. **Оганесян А.Г., Наджарян А.М., Багдасарян А.Т.** Геомеханическое обоснование системы разработки с нисходящей слоевой выемкой руды с железобетонным ограждающим межслоевым перекрытием // Сборник научных трудов института Армнипроцветмет, 1997 – 1998 гг. – Ереван: МАНКАВАРЖ, 1998. – С. 80-91.
6. **Агабян Ю.А., Оганесян А.Г., Наджарян А.М.** Выбор оптимальной системы разработки маломощных рудных тел в условиях Меградзорского золоторудного месторождения // Изв. НАН РА. Науки о Земле. – Ереван, 2001. – Том LIV, N1-2. – С. 50-53.
7. **Գևորգյան Հ., Նաջարյան Ա. և Հովհաննիսյան Ա.** Օպտիմալ մշակման համակարգի ընտրությունը «կրիտիկական հզորություն» գնահատման ցուցանիշի միջոցով // ՀՊՀՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. – Երևան, 2001. – Հ. 2. – էջ 478 – 479:
8. **Оганесян А.Г., Наджарян А.М.** Выбор системы разработки рудного месторождения с помощью показателя «Критическая мощность» // Науч. труды ЗАО Горно-металлургический институт. – Ереван: Изд-во “Егря”, 2002. – С. 154 –162.
9. **Աղաբալյան Յու., Հովհաննիսյան Ա., Նաջարյան Ա., Մարգարյան Ա.** Ալավերդու հանքավայրի չափազանց բարակ հանքամարմինների օպտիմալ մշակման համակարգի ընտրումը // ՀՊՀՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. – Երևան, 2002. – Հ.2. – էջ 424 – 425:
10. **Агабян Ю.А., Оганесян А.Г., Саркисян А.Г.** Оптимизация разработки весьма тонких рудных тел // Горный журнал. – М., 2005. – N1.- С. 13-16.
11. **Агабян Ю.А., Оганесян А.Г., Саркисян А.Г.** Использование оценочных «критических» показателей при выборе оптимальных систем подземной разработки // Вестник инженерной академии Армении: Сборник научно-технических статей. – Ереван, 2005. – Т. 2, N1. – С. 74 – 79.

12. Агабалян Ю.А., Агабалян А.Ю., Оганесян А.Г., Багдасарян А.Т. Оптимизация разработки весьма тонких рудных тел цветных и благородных металлов // Materials of the International scientific and practical conference, "Science and Education". - Sheffield, Science and education LTD. - 2014. - Vol. 20. Technical sciences. - P. 76 – 83.
13. Агабалян Ю.А., Оганесян А.Г., Алавердян А.А., Агабалян Ю.А./мл./ Критерии выбора системы подземной разработки золотополиметаллического месторождения // Горный журнал. – М., 2013. – N2. – С. 105-108.
14. Հովհաննիսյան Ա., Ալավերդյան Հ., Տեփանոսյան Գ. Փոքր հզորության հանքամարմինների մշակման համար ստորգետնյա ինքնագնաց տեխնիկայի կիրառման տիրույթի հիմնավորումը // «Հանքագործ և մետալուրգ» հանդես. – Երևան, 2012. – N3(18). – էջ 34 – 37:
15. Оганесян А.Г., Алавердян А.А., Агабалян Ю.А. /мл./, Тепаносян Г.О. Обоснование области применения доставочной техники при отработке маломощных рудных тел // Горный журнал. – М., 2013. – N12. – С. 45-47.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.05.2024:

**Л.С. МАИЛЯН**

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ,  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ И СОЗДАНИЮ НОВЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ  
РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ В  
АРМЕНИИ**

Ряд месторождений цветных и благородных металлов в Республике Армения, в том числе Тертерасарское и Бардзридерское золоторудные, Тундирское золото-медное, Алавердинское и Капанское медные и другие, характеризуется сравнительно богатыми, но небольшими запасами; преимущественно весьма тонкими и тонкими рудными телами, часто выраженными сложной морфологией; переменной мощностью; длинной распространения и глубиной падения, а также часто неустойчивыми рудами и вмещающими породами.

Исследования, проводимые в области выбора оптимальных, совершенствования и создания новых систем подземной разработки месторождений в вышеуказанных природных условиях на кафедре “Горного дела и охраны окружающей среды” Национального политехнического университета Армении, свидетельствуют о важности проблемы.

Приведены примеры выбора оптимальных, развития и создания новых систем подземной разработки весьма тонких и тонких рудных тел Меградзорского золоторудного, Алавердинского медного и Шаумянского золото-полиметаллического месторождений, направленного на сокращение ширины очистного пространства, необходимость использования закладки выработанного пространства и осуществления раздельной выемки руды. Последние приводят, с одной стороны, к увеличению некоторых затрат на добычу руды, а с другой - к росту качественных и количественных показателей извлечения руды из недр.

**Ключевые слова:** полезное ископаемое, золото, руда, система разработки, мощность, содержание.

L.S. MAILYAN

**RESULTS OF WORK ON SELECTING OPTIMAL SYSTEMS, IMPROVING AND CREATING NEW SYSTEMS FOR UNDERGROUND MINING OF LOW-POWER STEEP-DIP ORE BODIES IN ARMENIA**

A number of deposits of non-ferrous and precious metals in Republic of Armenia, including Terterasar and Bardzradir gold, Tundir gold-copper, Alaverdi and Kapan copper and others, are characterized by relatively rich, but small reserves, predominantly extremely thin and thin ore bodies, often expressed not complicated morphology, variable thickness, length of distribution and depth of dip, also often unstable ores and host rocks.

Research conducted in the field of selecting, developing, improving, and creating innovations in the field of optimal underground mining systems under the above-mentioned natural conditions at the Department of Mining and Environmental Protection of National Polytechnic University of Armenia in Republic of Armenia indicates the importance of the problem.

Examples of selection of optimal, development and creation of new systems of underground mining of extremely thin and thin ore bodies of the Meghradzor gold, Alaverdi copper and Shahumyan gold-polymetallic deposits are given, aimed at reducing the width of the cleaning space, the need to use the backfill of the mined-out space and the implementation of separate ore extraction. The latter lead, on the one hand, to an increase in some costs of ore extraction, and on the other hand, to an increase in the qualitative and quantitative indicators of ore extraction from the subsoil.

**Keywords:** mineral, gold, ore, development system, productivity, content.

**Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ռ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ**

**ՀՈՎԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ  
ԳՆԱՀԱՏՈՒԹՄԱՆ («ՀՐԱԶԴԱՆ-5» ՋԷԿ-Ի ՕՐԻՆԱԿՈՎ)**

Հետազոտվել են «Հրազդան-5» ՋԷԿ-ի հովացման թաց և չոր համակարգերի համակցման հնարավորությունն ու նպատակահարմարությունը, գնահատվել է համակցման արդյունավետությունը:

**Առանցքային բառեր.** հովացման չոր համակարգ, հովացման թաց համակարգ, հովացման համակցված համակարգ, հովացման համակարգի մաթեմատիկական մոդել, ցայտավազան:

**Ներածություն:** Հովացման չոր և թաց համակարգերի համեմատական վերլուծությունը ակնհայտ է դարձնում դրանց առավելությունները և թերությունները միմյանց համեմատ: Համակարգերի համակցումը թույլ է տալիս միաժամանակ օգտագործել դրանց առավելությունները՝ հնարավորինս նվազեցնելով թերությունների բացասական ազդեցությունը:

ՋԷԿ-երի շրջանառու տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգերում հովացման չոր կամ թաց տարբերակի ընտրությունը խիստ ազդում է համակարգի արդյունավետության և հուսալիության վրա: Այսպես, չոր, մասնավորապես՝ Հելլերի համակարգերը, թաց համակարգերի համեմատ, պահանջում են ավելի մեծ կապիտալ ներդրումներ, աշխատանքի ընթացքում ապահովում են ավելի թույլ նոսրացում և բնութագրվում են կլիմայական պայմաններից առավել խիստ կախվածությամբ, ինչն արտահայտվում է արդյունավետության նվազմամբ տարվա շոգ եղանակներին և հուսալիության նվազմամբ՝ ցուրտ եղանակներին: Մինևույն ժամանակ, չոր համակարգերի կիրառումը հնարավորություն է՝ գործնականում բացառելու թաց համակարգերին բնորոշ ջրի գոլորշիացմամբ, տարվածքով և արտափչմամբ կորուստները, որոնք կազմում են շրջանառու ջրի 3,5...4,0%-ը և համեմատելի են կոնդենսատորում խտացող շոգու քանակի հետ:

**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Շահագործման մեջ գտնվող շոգետուրբինների զարգացրած հզորության առավել հաճախակի դարձող և առավել խորը չափով տեղի ունեցող այն սահմանափակումները, որոնք պայմանավորված բնակլիմայական պայմաններով, որպես կանոն, դրանց հովացման համակարգերի «ծերացման» հետևանք են:

Հելլերի համակարգով կահավորված էներգաբլոկների արդյունավետության գնահատումները, որոնք իրականացվել են Հրագրանի ՋԷԿ-ի դեռևս յուրացման փուլում, ցույց են տվել, որ 4000  $ւ^2$  մակերեսով թաց հովարանով կահավորված 200 *ՄՎտ* էներգաբլոկը, Հելլերի հովարանով կահավորվածի համեմատ, տարեկան կտա 7 *մլն կՎտժ*-ով ավելի էներգիա՝ կոնդենսատորում ապահովելով ավելի խոր նոսրացում արտաքին օդի 0 °C-ից ցածր և +5 °C-ից բարձր ջերմաստիճանների դեպքում և ավելի թույլ նոսրացում ջերմաստիճանային մյուս տիրոյթներում [1]:

Թաց և չոր համակարգերի մի կողմից՝ բարձր օ.գ.գ.-ն, մյուս կողմից՝ առավել ջրախնայողության հակասությունը ի վերջո հանգեցրեց հովացման համակցված համակարգերի ներդրմանը, որոնք, տարբեր ռեժիմային և սեզոնային պայմանների դեպքում, հնարավորություն են տալիս՝ այս կամ այն չափով օգտագործելու այն համակարգը, որի արդյունավետությունը տվյալ պահին ավելի բարձր է:

Համակցված համակարգերի օրինակներ են համադրված և հիբրիդային հովարանները [2, 3]: Դրանց առավելություններն են.

- ✓ ջրի խնայողությունը. թաց ռեժիմը միանում է միայն անհրաժեշտության դեպքում,

- ✓ բարձր արդյունավետությունն ամռանը. կարող է ապահովել 5...15 °C-ով ավելի ցածր կոնդենսացիոն ջերմաստիճաններ՝ ի համեմատ միայն չոր համակարգերի,

- ✓ շրջակա միջավայրի վրա նվազ բացասական ազդեցությունը, որն արտահայտվում է ջրի ավելի փոքր սպառմամբ,

- ✓ կայուն աշխատանքը ամբողջ տարվա ընթացքում:

Որպես համակցված համակարգերի թերություններ պետք է համարել ավելի բարդ կառավարման ավտոմատիկան և ավելի բարձր նախնական ներդրումները:

Եթե նոր կառուցվող կայանների դեպքում նախապատվությունը կարող է տրվել համակցված համակարգերի կիրառմանը, ապա արդեն գոյություն ունեցող էներգաբլոկների դեպքում տնտեսապես բավականին արդյունավետ կարող է լինել գոյություն ունեցող հովացման համակարգի «վերակառուցումը» համակցված համակարգի: Այս աշխատանքը պահանջում է մանրակրկիտ ուսումնասիրություն ամեն մի կոնկրետ կայանի դեպքում՝ առանձնացնելով դրա յուրահատկությունները, և նախատեսվող լուծումների հարմարեցումը արդեն գոյություն ունեցող համակարգերին:

Մասնավորապես, «Հրագրան-5» էներգաբլոկը, ելնելով տեխնոլոգիական, այն է՝ յուղի և գեներատորի բավարար հովացումն ապահովելու նկատառումներից, կահավորված է նաև հովացման թաց համակարգով: Շոգետուրբինի կոնդենսատորի հովացումն իրականացվում է Հելլերի համակարգով, իսկ մնացած սարքավորումներինը՝ առանձին կոնտուրով աշխատող ցայտավազանով: Աշխատանքի

բնույթից ելնելով՝ ավելի ճիշտ է հովացման այս համակարգերին ոչ թե համակցված, այլ ուղղակի համատեղ անվանելը, քանզի նրա երկու բաղկացուցիչ՝ թաց և չոր մասերը, գործում են միմյանցից անկախ, ծառայում են տարբեր նպատակների և ռեժիմային առումով որևէ ազդեցություն չունեն իրար նկատմամբ:

Հովացման թաց և չոր համակարգերը իրարից միանջանակ տարանջատելու համար դրանք տեքստում այսուհետ կանվանվեն համապատասխանաբար տեխնիկական և շրջանառու ջրամատակարարման համակարգեր:

Տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգը բաղկացած է.

✓ թվով 2 հատ ցայտավազաններից՝ 208x37 *ս/ն* 172x37 *ս/ն* չափերով, և կահավորված գումարային թվով 62 հատ B-75 տիպի փողրակներով,

✓ պոմպակայանից, որում տեղադրված են D-6300x27-2 տիպի թվով 3 հատ և 20HДH տիպի թվով 2 հատ պոմպեր,

✓ DN1000 մայրուղային խողովակաշարերից (2,5 *կս*), անջատող արմատուրից (25 հատ) և այլն:

Շրջանառու ջրամատակարարման համակարգը բաղկացած է.

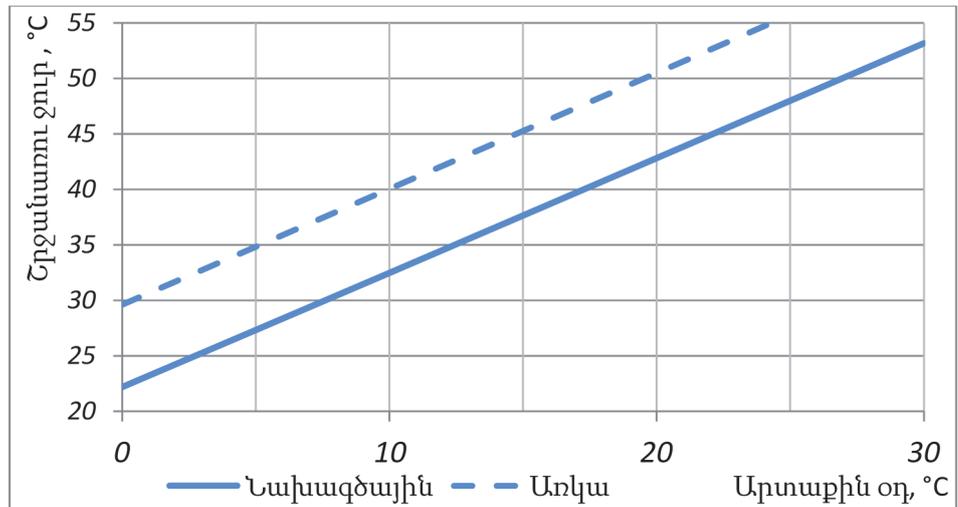
✓ հովացման աշտարակից՝ 160 *ս* բարձրությամբ և կահավորված թվով 192 հատ դելտաներով,

✓ պոմպակայանից, որում տեղադրված են HД-1000 տիպի թվով 2 հատ և D-6300x27-2 տիպի թվով 2 հատ պոմպեր,

✓ DN2000 մայրուղային խողովակաշարերից (1,5 *կս*), անջատող արմատուրից (60 հատ) և այլն:

Երկու համակարգերն էլ շահագործման մեջ են գտնվում ավելի քան 20 տարի: Մակայն շրջանառու համակարգի աշխատանքային բնութագրերը, ի տարբերություն տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգի, բավականին շեղված են իրենց նախագծային արժեքներից: Դա հիմնականում պայմանավորված է դելտաների խողովակաշարերի և արտաքին մակերևույթների չվերականգնվող վնասվածքներով, այդ թվում՝ չվացվող նստվածքների առկայությամբ:

Շրջանառու համակարգի հովացման նախագծային և առկա բնութագրերը ներկայացված են նկ. 1-ում: Ինչպես երևում է նկ. 1-ում պատկերված գրաֆիկներից, շրջանառու ջրի ջերմաստիճանները ներկա դրությամբ բարձր են իրենց նախագծային արժեքներից 7...8 °C-ով, ինչի հետևանքով էներգաբլոկի վառելիքի տեսակարար ծախսը բարձրանում է 2...6 *գպվ/կՎտժ*-ով:



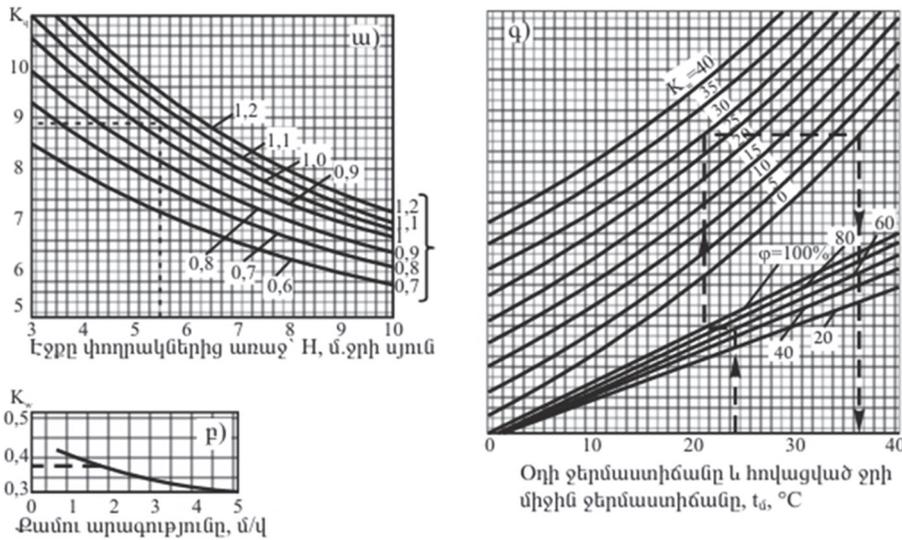
Նկ. 1. Շրջանառու ջրի ջերմաստիճանը կոնդենսատորի ելքում արտաքին օդի 0...30°C ջերմաստիճանների տիրույթում, երբ արտանետվող ջերմաքանակը 400 ՄՎտ է, շրջանառու ջրի ծախսը՝ 36000 մ<sup>3</sup>/ժ, հովարանում միացված սյուների քանակը՝ 384 հատ. ա) նախագծային տվյալներ, բ) առկա՝ 2024թ. դրությամբ վերլուծության արդյունքներ

«Հրազդան-5» էներգաբլոկի պարագայում շրջանառու համակարգի բնութագրերի լավացման բավականին օպտիմալ տարբերակ է դրա համակցումը տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգի հետ: Տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգը ներկայումս օգտագործվում է շուրջ 10...15 ՄՎտ ջերմանջատման ապահովման նպատակով, որի համար բավարար է թվով 15...20 հատ փողրակների միացումը: Նկատի ունենալով, որ ցայտավազանների չափերը և տեղադրված պոմպերի քանակը թույլ են տալիս փողրակների քանակը հասցնել 104-ի և ապահովել շուրջ 13 հազ մ<sup>3</sup>/ժ տեխնիկական ջրի ծախս, առաջին մոտեցմամբ կատարված հաշվարկները ցույց են տալիս, որ տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգը կարող է ապահովել շուրջ 60 ՄՎտ ջերմանջատում, որից 48 ՄՎտ-ը կարող է օգտագործվել շրջանառու ջրի հովացման համար:

Առավել մանրամասն և բազմագործոն հաշվարկների համար, որոնք այնուհետև կարող են դրվել հովացման համակցված համակարգի ռեժիմների լավարկման հիմքում, անհրաժեշտ է կիրառել շրջանառու և տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգերի մաթեմատիկական մոդելները:

Շրջանառու ջրամատակարարման համակարգի մաթեմատիկական մոդելի հիմքում դրվել են ՀՊՃՀ «Ջերմաէներգետիկա» ամբիոնի կողմից ավելի վաղ մշակված երկու ալգորիթմները [4, 5]:

Տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգի մաթեմատիկական մոդելը մշակվել է [6]-ում տրված նումոգրամների հիման վրա (նկ. 2):



Նկ. 2. Ցայտավազանի հաշվարկային նոմոգրամը [6]

Համակարգչային հաշվարկներում կիրառելի դարձնելու և վերոհիշյալ նոմոգրամների հիման վրա  $K_q$ ,  $K_w$  ժամողակ գործակիցների ու ջրի միջին  $t_{ui}$  ջերմաստիճանի արժեքները որոշելու համար՝ ռեգրեսիոն անալիզի միջոցով ստացվել են հետևյալ հավասարումները.

$$K_q = 5,1 - 0,683 \times H + 11,4 \times Q + 0,044 \times H^2 - 2,665 \times Q^2 - 0,466 \times H \times Q,$$

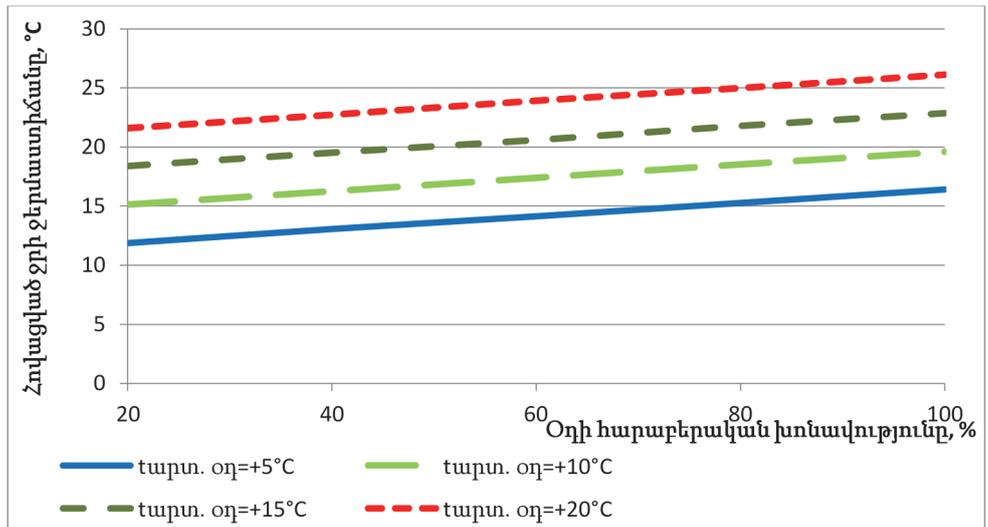
$$K_w = 0,3085 + 0,1843 \times \exp(-w),$$

$$K = K_q \times K_w \times \Delta t,$$

$$t_{ui} = 8,1 + 0,686 \times t_{oi} + 0,4775 \times K - 6,48 \times (1 - \phi)^{1,25},$$

որտեղ  $H$ -ը ջրի ճնշումն է փողրակներից առաջ,  $l$ ,  $Q$ -ն՝ ոռոգման խտությունը,  $l^3/(l^2 \delta)$ ,  $w$ -ն՝ քամու արագությունը,  $l/վ$ ,  $\Delta t$ -ն՝ ջրի հովացման չափը, °C,  $t_{ui}$ -ը՝ ջրի միջին ջերմաստիճանը, °C,  $t_{oi}$ -ը՝ օդի ջերմաստիճանը, °C,  $\phi$ -ն՝ օդի հարաբերական խոնավությունը:

**Հետազոտության արդյունքները:** Նկ. 3-ում ներկայացված է ցայտավազանում հովացված ջրի ջերմաստիճանի կախվածությունը արտաքին օդի ջերմաստիճանից և խոնավությունից: Ակնհայտ է, որ օդի խոնավության գործոնը ոչ պակաս «ազդեցիկ» է օդի ջերմաստիճանից:



Նկ. 3. Ցայտավազանում հովացված ջրի ջերմաստիճանը՝ կախված արտաքին օդի ջերմաստիճանից և խոնավությունից, երբ արտանետվող ջերմաքանակը 23,2 ՄՎտ (20 Գկալ/ժ) է, ջրի ծախսը՝ 8200 մ<sup>3</sup>/ժ (միացված է 62 փողրակ)

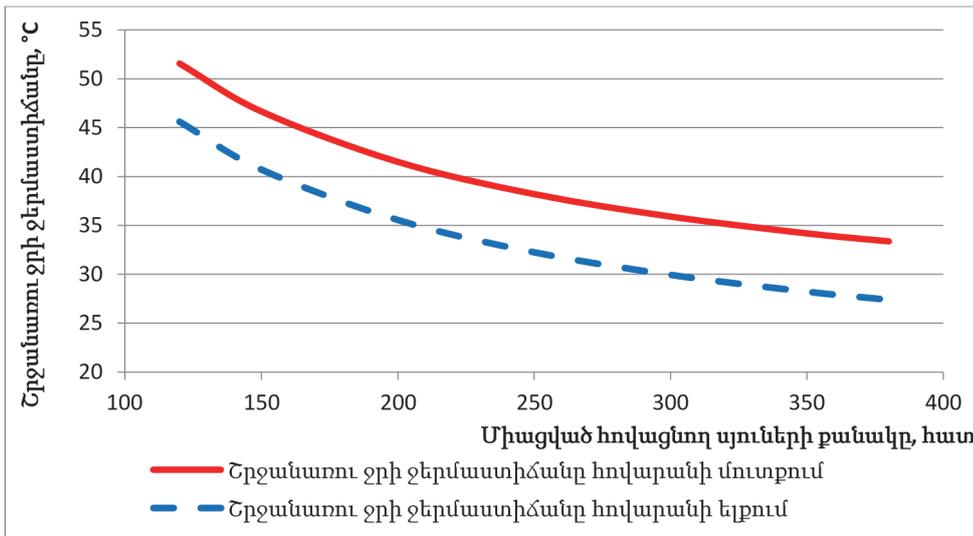
Ի տարբերություն ցայտավազանի՝ շրջանառու համակարգի աշխատանքի վրա օդի հարաբերական խոնավության ազդեցությունը գործնականում աննշան է, իսկ ջերմաստիճանի ազդեցությունը՝ առավել զգալի: Խոնավության 20...100% պայմաններում կատարված հաշվարկները ցույց են տալիս, որ շրջանառու ջրի ջերմաստիճանի փոփոխությունը չի գերազանցում 0,2 °C-ը, ընդ որում, որքան բարձր է օդի խոնավությունը, այնքան բարձր է շրջանառու ջրի ջերմաստիճանը: Համեմատության համար հարկ է նշել, որ ցայտավազանով թաց համակարգում այդ տարբերությունը կազմում է 4...5 °C (նկ. 3):

Ինչպես երևում է նկ. 1, 3-ում պատկերված գրաֆիկներից, արտաքին օդի յուրաքանչյուր 1 °C-ով ջերմաստիճանի բարձրացումը հանգեցնում է շրջանառու ջրի ջերմաստիճանի բարձրացմանը 1,0...1,1 °C-ով, մինչդեռ ցայտավազանային թաց համակարգում այդ տարբերությունը կազմում է 0,5...0,65 °C:

Շրջանառու համակարգի համար մշակված մոդելի միջոցով ուսումնասիրվել է նաև դրա հովացման խորությունը՝ կախված աշխատանքի համար միացված հովացնող էլեմենտների քանակից: Ինչպես երևում է նկ. 4-ում պատկերված գրաֆիկից, յուրաքանչյուր հաջորդ միացվող էլեմենտի արդյունավետությունն ավելի փոքր է, քան իր նախորդինը:

Շրջանառու և տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգերի համակցումն իրականացվում է ջրաջրային ջերմափոխանակիչների կիրառմամբ: Շրջանառու ջրի մի մասը, չոր հովարանին զուգահեռ, տրվում է վերոնշյալ ջերմափո-

խանակիչներով, որոնք հովացվում են տեխնիկական ջրով: Ջերմափոխանցման ընդհանուր մակերեսը կազմում է 4000 մ<sup>2</sup>, ջերմափոխանակիչների քանակը և յուրաքանչյուրի մակերեսը կարող են որոշվել աշխատանքային փաստաթղթերի մշակման ժամանակ:

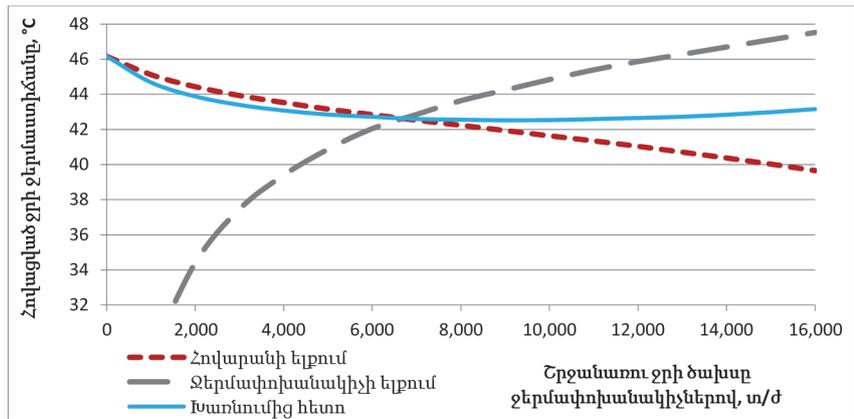


Նկ. 4. Հեղուկի հովարանի մուտքում շրջանառու ջրի ջերմաստիճանը՝ կախված միացված հովացնող սյուների քանակից, արտաքին օդի ջերմաստիճանը 15°C է, արտանետվող ջերմաքանակը 250 ՄՎտ, շրջանառու ջրի ծախսը՝ 36000 մ<sup>3</sup>/ժ

Շրջանառու և տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգերի մշակված մաթեմատիկական մոդելների կիրառմամբ կատարված հաշվարկներով հիմնավորվում է համակցման նպատակահարմարությունը: Դրա արդյունքում, շոգ եղանակային պայմաններում, արտանետվող գոլորշու ջերմաստիճանը կոնդենսատորում նվազում է 1,5...3,5 °C-ով, ընդ որում, որքան բարձր են արտաքին օդի ջերմաստիճանը և կոնդենսատորի ջերմային բեռը, այնքան բարձր է համակցման արդյունավետությունը:

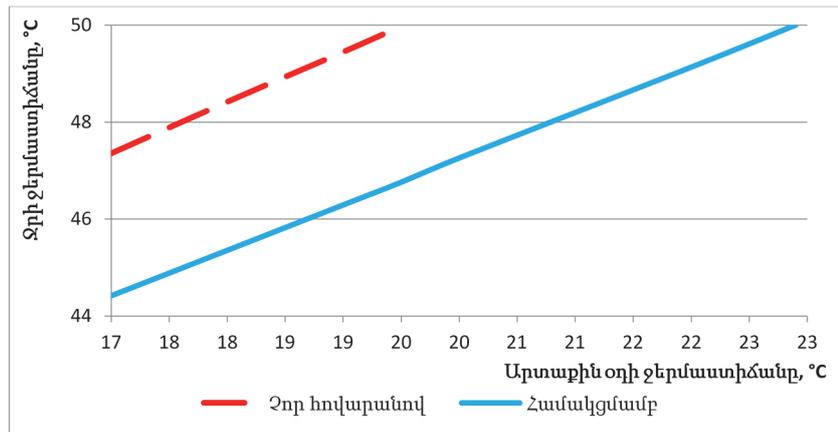
Մասնավոր դեպքի համար կատարված հաշվարկների արդյունքները ներկայացված են նկ. 5-ում: Այս և հետագա հաշվարկներում տեխնիկական ջրի ծախսը ջրաջրային ջերմափոխանակիչներով ընդունվել է 9300 մ<sup>3</sup>/ժ, որը համարժեք է ցայտավազանում լրացուցիչ թվով 70 հատ փողրակների միացմանը:

Նկ. 5-ում ներկայացված, ինչպես նաև այլ ռեժիմների դեպքում կատարված հաշվարկները ցույց են տալիս, որ ջրաջրային ջերմափոխանակիչներով անցնող շրջանառու ջրի օպտիմալ ծախսը կազմում է 6000...8000 մ<sup>3</sup>/ժ:



Նկ. 5. Հեղուկի հովարանի և ջրաջրային ջերմափոխանակիչների ելքերում և դրանց միախառնումից հետո կոնդենսատոր տրվող շրջանառու ջրի ջերմաստիճանները՝ կախված ջերմափոխանակիչներով շրջանառու ջրի ծախսից, երբ արտաքին օդի ջերմաստիճանը 25°C է, հարաբերական խոնավությունը՝ 60%, կոնդենսատորի ջերմային բեռը՝ 400 ՄՎտ, շրջանառու ջրի գումարային ծախսը՝ 36000 մ<sup>3</sup>/ժ

Մյուս կողմից՝ համակցված համակարգի կիրառումը հնարավորություն է տալիս՝ մեղմելու էներգաբլոկի հզորության սահմանափակման չափը՝ պայմանավորված բնակլիմայական պայմաններով: Միայն չոր հովարանով և համակցման սխեմայի կիրառմամբ շրջանառու ջրի ջերմաստիճանների կախվածությունը արտաքին օդի ջերմաստիճանից ներկայացված է նկ. 6-ում:



Նկ. 6. Միայն չոր հովարանով և համակցման սխեմայի կիրառմամբ կոնդենսատորի մուտքում շրջանառու ջրի ջերմաստիճանի կախվածությունը արտաքին օդի ջերմաստիճանից, երբ կոնդենսատորի ջերմային բեռը կազմում է 400 ՄՎտ, շրջանառու ջրի գումարային ծախսը՝ 36000 մ<sup>3</sup>/ժ, իսկ համակցման տարբերակի դեպքում՝ չոր հովարանով 28000 մ<sup>3</sup>/ժ և ջրաջրային ջերմափոխանակիչներով՝ 8000 մ<sup>3</sup>/ժ

Ինչպես երևում է նկ. 6-ում ներկայացված գրաֆիկից, համակցման արդյունքում էներգաբլոկի առավելագույն բեռի դեպքում սահմանափակումը սկսվում է արտաքին օդի 22,9 °C-ից այն պարագայում, երբ միայն չոր հովարանով այն կազմում է 19,5 °C: Համեմատության համար նշենք, որ ըստ մշակված մոդելով կատարված հաշվարկների՝ միայն չոր հովարանով աշխատելու դեպքում, արտաքին օդի 22,9 °C պայմաններում, էներգաբլոկի շոգետուրբինի հզորությունը պետք է նվազեցվի և կազմի 240 ՄՎտ՝ 300 ՄՎտ-ի փոխարեն:

**Եզրակացություն:** ՋԷԿ-ի հովացման սխեմայում համակցված համակարգի կիրառումը կարող է բավականին արդյունավետ լինել համակարգի բաղկացուցիչ մասերի ճիշտ ընտրության և դրանց միջև հովացնող ջրի, կամ որ նույնն է՝ ջերմային բեռնվածության բաշխման լավարկման արդյունքում:

Մասնավորապես, «Հրազդան-5» ՋԷԿ-ի դեպքում հովացման չոր համակարգի համակցումը թաց համակարգով, ըստ էության, կրում է «գազաթնային» բնույթ և նպատակահարմար է իրականացնել արտաքին օդի դրական ջերմաստիճանների պայմաններում: Համակցման կիրառման արդյունքում, ի լրումն ՋԷԿ-ի արդյունավետության բարձրացման, նվազում է նաև առավելագույն բեռի սահմանափակման չափը՝ պայմանավորված արտաքին օդի ջերմաստիճանով: Օրինակ՝ միայն չոր հովարանով աշխատելու պայմաններում, սկսած արտաքին օդի 19,5 °C ջերմաստիճանից անհրաժեշտ է բեռնաթափել շոգետուրբինը, իսկ հովացման համակցման կիրառման արդյունքում այդ ջերմաստիճանը կազմում է 22,9 °C: Հարկ է նշել, որ միայն չոր հովարանով աշխատելու դեպքում, արտաքին օդի 22,9 °C պայմաններում, էներգաբլոկի շոգետուրբինի զարգացրած հզորությունը պետք է նվազեցվի և կազմի 240 ՄՎտ՝ 300 ՄՎտ-ի փոխարեն:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Пуско-наладочные и экспериментальные работы по градирне воздушно-конденсационной установки блока №1 200 МВт Разданской ГРЭС. Инв. 6545/ Исполнители А.П. Середя, Г.П. Гаврюшенков, В.И. Горбенко: Отчет южного отделения ОРГРЭС.-Львов, 1972.-32 с.
2. **Մարտիկյան Ռ.Ջ., Հովհաննիսյան Լ.Ս.** Ջրախնայողական տեխնոլոգիաների օգտագործումը էներգետիկայում: Դասագիրք.- Եր.: Ճարտարագետ, 2007.- 288 էջ:
3. **Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И.** Градири промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / Под общ. ред. В.С. Пономаренко.- М.: Энергоатомиздат, 1998.- 376 с.
4. Моделирование низкопотенциальной части тепловой схемы энергоблоков Разданской ГРЭС и оптимизация режимов работы оборудования: Отчет ЕрПИ. IV завершающий этап / Руководитель работы К.А. Тер-Мкртчян.- Ереван, 1981.- 125 с.
5. Моделирование низкопотенциальной части тепловой схемы энергоблоков Разданской ГРЭС и оптимизация режимов работы оборудования: Отчет ЕрПИ. III завершающий этап / Руководитель работы Л.Т. Кулоян.-Ереван, 1980,- 111 с.

6. РД 34.22.507-90 Типовая инструкция по эксплуатации брызгальных установок.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.12.2025:

**В.З. МАРУХЯН, Р.А. ВАРДАНЯН**

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
ОХЛАЖДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТЭС «РАЗДАН-5»)**

Исследованы возможность и целесообразность комбинирования мокрой и сухой систем охлаждения на ТЭС «Раздан-5», дана оценка эффективности такого совмещения.

**Ключевые слова:** сухая система охлаждения, мокрая система охлаждения, комбинированная система охлаждения, математическая модель системы охлаждения, брызгальный бассейн.

**V.Z. MARUKHYAN, R.A. VARDANYAN**

**ASSESSING THE EFFICIENCY OF A COMBINED COOLING SYSTEM (ON THE  
EXAMPLE OF THE «HRAZDAN-5» TPP)**

The feasibility and expedience of combining wet and dry cooling systems at the «Hrazdan-5» Thermal Power Plant are investigated, and the effectiveness of such a combination is assessed.

**Keywords:** dry cooling system, wet cooling system, combined cooling system, cooling system mathematical model, spray pool.

**А.В. ТАДЕВОСЯН, В.З. МАРУХЯН, А.С. АКАРМАЗЯН**

## **ОЧИСТКА РЕЧНЫХ ВОД, ВПАДАЮЩИХ В ОЗЕРО СЕВАН**

Загрязнение озера Севан главным образом осуществляется водами рек впадающих в озеро. В озеро Севан вливаются воды 28 больших и малых рек. К сравнительно крупным рекам относятся Гаварагет и Масрик, которые являются наиболее загрязненными, производственными и сельскохозяйственными стоками.

Разработан способ очистки речных вод, в качестве объекта исследования рассмотрена река Гаварагет. Степень очистки воды от фосфат-ионов составляет 45...60%, а нитрат, нитрит-ионов – до 40%.

**Ключевые слова:** озеро Севан, река Гаварагет, загрязненность, метод очистки вод, сорбционная очистка.

**Введение.** Загрязнение вод реки Гаварагет осуществляется в основном коммунальными и промышленными стоками, стоками крупных животноводческих ферм, дренажными стоками поливных и дождевых вод) [1].

Этим обусловлено большое количество фосфатных и нитрат – нитритных соединений в водах, чем и объясняется загрязнение озера Севан.

При теплой погоде наличие этих ионов способствует быстрому размножению сине-зеленых водорослей (*codium parvolum*), которые распространяются по озеру, особенно в прибрежных районах.

Чтобы предотвратить “цветение” озера, необходимо свести к минимуму содержание азота и фосфора в реках, впадающих в озеро Севан.

**Методы исследования.** Анализ результатов исследований показал, что концентрация в реке превышает предельно допустимые концентрации, например, фосфора - в 2,4...4,8, железа - 2,6, натрия -1,1 раза [2].

Для очистки речных вод предложен адсорбционный метод, а в качестве сорбента выбран комбинированный сорбент, состоящий из вспученного перлита и травертина в соотношении 1,0:2,0...2,5. С целью исследования процесса адсорбции была собрана лабораторная установка (рис. 1). Колонна ( $d=95$  мм,  $H=850$  мм) заполнена сорбентом [3, 4].

Пробы воды реки Гаварагет были взяты за январь-май и август месяцы 2025 г, после чего были подвергнуты очистке в лабораторных условиях. Результаты загрязненной и очищенной воды приведены в таблице. Анализ загрязненной и очищенной воды проведен с помощью атомно-абсорбционного спектрометра 55AA фирмы “Agilent technologies”.



Рис. 1. Лабораторная установка

Таблица

Результаты исследований вод река Гаварагет

Состав/ месяц	Январь		Февраль		Март		Апрель		Май		Август	
	Загрязненная вода, мг/л	Очищенная вода, мг/л										
Фосфат-ион	0,645	0,28	1,36	0,57	1,10	0,61	0,36	0,13	0,17	0,08	0,17	0,07
Нитрат-ион	11,171	8,24	25,032	15,8	3,20	2,23	1,87	1,0	0,82	0,44	0,33	0,19
Общий фосфор	0,834	0,63	0,872	0,645	0,937	0,721	0,57	0,41	0,42	0,28	0,37	0,18
Нитрит-ион	-	-	-	-	2,90	2,01	0,57	0,38	0,28	0,18	0,18	0,08
Натрий	14,88	16,19	45,38	23,65	13,52	6,25	10,10	5,25	21,00	10,10	17,35	16,24
Магний	14,45	11,69	31,52	14,35	10,67	4,34	7,62	3,45	15,06	6,24	12,75	10,95
Калий	-	-	15,66	5,16	14,76	3,91	13,12	5,3	6,98	2,43	4,69	3,64
Кальций	-	-	40,11	12,95	26,91	10,83	22,41	8,6	21,0	8,34	16,81	4,35
Железо	0,107	0,01	0,221	0,01	0,238	0,014	0,174	0,008	0,15	0,005	0,16	0,006

**Результаты исследования.** Для очистки речных вод предлагается устройство, устанавливаемое поперек реки, высота которого соответствует максимальному потоку реки. Устройство разделено на одинаковые части, в

которых устанавливаются кассеты с сорбентом. Кассеты изготовлены из полипропиленовых листов толщиной 50 мм, на передней и задней частях которых имеются отверстия (диаметр отверстий - 0,1 мм, на расстоянии друг от друга - 0,4 мм). Габаритные размеры кассет – 100 х 200 х 300 мм (рис. 2) [3, 4].



*Рис. 2. Кассета с сорбентом*

При насыщении сорбентов кассеты вынимаются из устройства и загружаются свежим сорбентом (рис. 3).



*Рис. 3. Вынос кассеты с насыщенным сорбентом*

Для предотвращения забивки кассеты твердыми крупными отходами до места расположения кассет устанавливается сетка с соответствующими размерами отверстий (рис. 4).

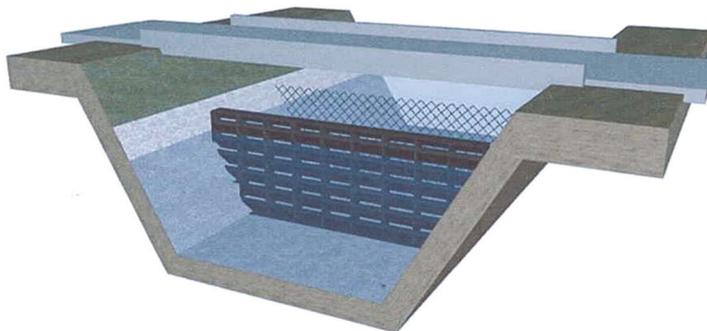


Рис. 4. Сетка для предотвращения забивки кассет крупными отходами

Анализ полученных результатов показывает, что с использованием предложенного метода и установки можно очистить загрязненную воду реки Гаварагет от фосфат-ионов до 60%, нитрат, нитрит ионов - 40%, ионов железа – 95%, ионов Na, K, Mg, Ca - 50...70%. При наличии ионов тяжелых металлов (Cu, Zn, Mo) практически в очищенной воде не содержится.

**Заключение.** Разработан способ и предложена установка для очистки речных вод. Данные получены для реки Гаварагет. Метод позволяет значительно сократить загрязненность речных вод и, в конечном итоге, загрязненность озера Севан.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Габриелян Б.К., Геворгян С.А., Мкртчян Ф.А.** Некоторые особенности диагностики экологического состояния озера Севан // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2023.-12.- С.128-136.
2. База данных для проведения полноценной экологической экспертизы.- Ереван, 2002.-226 с.
3. **Тадевоян А.В., Мартиросян П.Г.** Способ очистки речных вод // Вестник НПУА: Химические и природоохранные технологии. -2022.-№ 1. -С. 44-46.
4. Արտոնագիր 750 Կ, Գետի ջրերի մաքրման եղանակ/ **Ա.Վ. Թադևոյան, Ռ.Գ. Մարտիրոսյան**.- 2022.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 01.12.2025.

**Ա.Վ. ԹԱՂԵՎՈՍՅԱՆ, Վ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ա.Ս. ԱԿԱՐՄԱԶՅԱՆ**

**ՄԵՎԱՆԱ ԼԻՃ ԹԱՓՎՈՂ ԳԵՏԵՐԻ ՋՐԵՐԻ ՄԱՔՐՈՒՄԸ**

Սևանա լիճը հիմնականում աղտոտվում է լիճը թափվող գետերից: Սևանա լիճը ջուր է ստանում 28 մեծ և փոքր գետերից: Գավառագետ և Մասրիկ գետերը համեմատաբար մեծ են և ամենաաղտոտվածն են՝ արդյունաբերական և գյուղատնտեսական հոսքաջրերով:

Մշակվել է գետային ջրերի մաքրման մեթոդ, որի շրջանակներում ուսումնասիրվում է Գավառագետ գետը: Ջրից ֆոսֆատային իոնների հեռացման մակարդակը կազմում է 45-60%, իսկ նիտրատների և նիտրատային իոնների հեռացման մակարդակը՝ մոտավորապես 40%:

**Առանցքային բառեր:** Սևանա լիճ, Գավառագետ գետ, աղտոտում, ջրի մաքրման մեթոդ, սորբմամբ մաքրում:

**A.V. TADEVOSYAN, V.Z. MARUKHYAN, A.S. AKARMAZYAN**

**CLEANING RIVER WATERS FALLING INTO LAKE SEVAN**

Lake Sevan is primarily polluted by the rivers flowing into the lake. Lake Sevan receives water from 28 large and small rivers. The Gavaraget and Masrik rivers are relatively large and are the most polluted with industrial and agricultural runoff.

A method for river water treatment has been developed, with the Gavaraget River being studied. The water's phosphate ion removal rate is 45-60%, while nitrate and nitrate ion removal is approximately 40%.

**Keywords:** Lake Sevan, Gavaraget River, pollution, water treatment method, sorption treatment.

**Ն.ՅՈՒ. ԴԱՎԹՅԱՆ**

**ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՂՏՈՏՎԱԾՈՒԹՅԱՆ  
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ**

Ուսումնասիրվել է ՋԷԿ-երի և ՋԷՑ-երի մակերևութային կոնդենսատորների խողովակների ներքին մակերևութի մակերեսների ադսորբացիայի ազդեցությունը նրանց աշխատանքի արդյունավետության վրա: Քանակական գնահատումները կատարվել են T-110/120-130 էներգաբլոկի համար՝ օգտագործելով փորձնական և հաշվարկային տվյալներ, որոնց հիման վրա կառուցվել են կախվածություններ կոնդենսատորի խողովակներում նստվածքազոյացման շերտի հաստության և էլեկտրական հզորության անկման միջև՝ տարբեր սկզբնական ջերմաստիճանային պայմաններում:

**Առանցքային բառեր.** կոնդենսացիոն տեղակայանք, մակերևութային կոնդենսատոր, նստվածքազոյացման ինտենսիվություն, ջերմափոխանցման գործակից, նստվածքազոյացման շերտի հաստություն:

**Ներածություն:** Ժամանակակից էներգետիկայում արդի խնդիրներից մեկը գործող էներգաբլոկների, ինչպես նաև նոր նախագծվողների էներգաարդյունավետության և տնտեսական շահավետության բարձրացումն է:

ՋԷԿ-երի շահագործման արդյունավետության վրա էական ազդեցություն են ունենում ցածրպոտենցիալային տեղակայանքների աշխատանքային ցուցանիշները և դրանց հիմնական հանգույցը՝ կոնդենսատորը: Կոնդենսատորի խողովակներում շրջանառություն կատարող հովացնող ջուրը, որպես կանոն, պարունակում է հանքային և օրգանական միացություններ, որոնք, կախված ջերմաստիճանային պայմաններից, ջրի հոսքի արագությունից, կոշտությունից և կոնդենսատորի անընդհատ շահագործման մեջ գտնվելու ժամանակահատվածից, խողովակների ներքին պատերի վրա առաջացնում են նստվածքազոյացումներ, ինչը հանգեցնում է ջերմափոխանցման արդյունավետության նվազմանը և ջերմային ռեժիմի փոփոխությունների:

Հետևաբար, անհրաժեշտ է գնահատել այս երևույթի ազդեցությունը և մշակել մաքրման օպտիմալ տարբերակներ:

**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Էլեկտրակայանի առկա հզորության կախվածությունը ցածրպոտենցիալային տեղակայանքների աշխատանքի արդյունավետությունից և բնակլիմայական պայմաններից, ի վերջո, հանգեցնում է ջրահովացման համակարգերից մթնոլորտ ջերմությունը փոխանցելու հնարավորությունների որոշմանը:

Վերջինով պայմանավորված՝ ամառային ժամանակահատվածում հովացնող ջրի ջերմաստիճանի բարձրացման հետևանքով որոշակիորեն սահմանափակվում է էներգաբյուրեղի զարգացրած հզորությունը (նախագծով նախատեսված աշտարակահովացուցիչների քանակ, շրջանառության պոմպերի անբավարար արտադրողականություն և այլն):

ՋԷԿ-երի կոնդենսատորների ջերմատեխնիկական վիճակը գնահատելու համար դիտարկենք հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանի կախվածությունը ֆիզիկական պարամետրերից՝  $T_{110/120-130}$  տուրբինի օրինակով:

Հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանի  $T_{միջ}$ -ի վրա ազդող ֆիզիկական պարամետրերն են.

1. Սկզբնական ջերմաստիճանը ( $T_{մուտք}$ ).

Հովացնող ջրի մուտքի բարձր ջերմաստիճանը հանգեցնում է միջին ջերմաստիճանի բարձրացմանը, ինչը նվազեցնում է ջերմափոխանակության ինտենսիվությունը.

$$T_{միջ} \sim f(T_{մուտք}):$$

2. Ելքի ջերմաստիճանը ( $T_{ելք}$ ).

Քանի որ  $T_{միջ} = \frac{T_{մուտք} + T_{ելք}}{2}$ , ելքի ջերմաստիճանի բարձրացումը հանգեցնում է միջին ջերմաստիճանի բարձրացմանը:

3. Ջրի հոսքի արագությունը ( $V$ ).

Հոսքի մեծ արագության դեպքում ջրի տաքացումը նվազում է, և միջին ջերմաստիճանը փոքրանում է.

$$T_{միջ} \downarrow, \text{ երբ } V \uparrow:$$

4. Ջերմափոխանցման մակերեսը ( $F$ ).

Ավելի մեծ մակերեսն ապահովում է ավելի ինտենսիվ ջերմափոխանակություն և ցածր միջին ջերմաստիճան:

5. Ջերմափոխանցման գործակիցը ( $k$ ).

Էապես կախված է ջրի մաքրության աստիճանից, ներխողովակային նստվածքներից և հիդրոդինամիկ ռեժիմից.

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T:$$

6. Արտաքին միջավայրի ջերմաստիճանը ( $T_{արտ}$ ).

Օդային հովացման դեպքում շրջակա միջավայրի բարձր ջերմաստիճանը նույնպես բարձրացնում է ջրի միջին ջերմաստիճանը:

Ելքի ջերմաստիճանը որոշվում է ջերմային հաշվեկշռից.

$$T_{արտ} = T_{մուտք} + \frac{Q}{c \cdot G},$$

որտեղ Q-ն փոխանցվող ջերմաքանակն է, Ջ, c-ն՝ ջրի ջերմունակությունը, Ջ/(կգ·°C), G-ն՝ ջրի զանգվածային ծախսը, կգ/վ:

Այսինքն՝

$$T_{արտ} = T_{միջ} + \frac{Q}{2c \cdot G} :$$

Հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանը հիմնականում կախված է ջրի մուտքի ջերմաստիճանից, ծախսից և ջերմափոխանակման պայմաններից:

Հովացման մակերևույթի աղտոտումը, նստվածքները և ջերմափոխանցման գործակցի նվազումը նույնպես հանգեցնում են միջին ջերմաստիճանի բարձրացման:

Հայտնի է, որ հովացնող ջրի ցածր որակական հատկանիշների պարագայում ջերմափոխանակիչ ապարատներին մատուցվող ջուրն ունակ է սարքավորման երկարատև շահագործման ընթացքում աղտոտելու կոնդենսատորի խողովակների ներքին մակերևույթը:

Կոնդենսատորի խողովակներում ձևավորվող նստվածքագոյացումներն ինտենսիվացնում են խողովակների մետաղի կոռոզիոն պրոցեսները, իսկ ջրում մանրահատիկ հղկանյութեր պարունակող կոշտ կախույթները (ավազ, մոխիր) հանգեցնում են խողովակների էրոզիոն – կոռոզիոն մաշվածքի: Ջրային կողմից կոնդենսատորների աղտոտումն առաջացնում է կոնդենսատորում նոսրացման վատացում, քանզի աղտոտման հետևանքով աճում է ջերմային դիմադրությունը, և բացի այդ, կրճատվում է ջրի ծախսը կոնդենսատորով՝ ի հետևանք վերջինիս հիդրավլիկ դիմադրության աճի:

Կատարվել է մակերևութային կոնդենսատորների աղտոտվածության ազդեցության հաշվարկային վերլուծություն՝ հիմնված էմպիրիկ և ֆիզիկական մոդելների վրա [1]:

1. Նստվածքագոյացման ինտենսիվությունը.

$$J=f(t,w,d,L,\zeta,I),$$

որտեղ t-ն հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանն է, °C, w-ն՝ հոսքի միջին արագությունը, մ/վ, d-ն՝ խողովակի ներքին տրամագիծը, մ, L-ը՝ խողովակի երկարությունը, մ, ζ-ն՝ մաքրումների միջև ընկած ժամանակահատվածը, Ժ, I -ն՝ ջրի կոշտությունը, մգ-էկվ/լ:

2. Ընդհանուր նստվածքի զանգվածը.

$$M=f \cdot S \cdot n \cdot z,$$

որտեղ S-ը մեկ խողովակի մակերևույթի նստվածքագոյացման միջին մակերեսն է, մ<sup>2</sup>, n-ը՝ խողովակների թիվը մեկ քայլում, z-ը՝ կոնդենսատորի քայլերի թիվը:

3. Աղտոտման շերտի հաստությունը.

$$\delta_{\bar{u}} = \frac{J}{\rho_{\bar{u}}},$$

որտեղ  $\rho_{\bar{u}}$ -ն նստվածքի խտությունն է,  $q/մ^3$ :

4. Աղտոտված կոնդենսատորի ջերմափոխանցան գործակիցը.

$$k_{\bar{u}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\bar{u}}}{\lambda_{\bar{u}}} + \frac{\delta_{\bar{u}}}{\lambda_{\bar{u}}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

որտեղ  $\alpha_1, \alpha_2$ -ը գոլորշու և ջրի ջերմատվության գործակիցներն են,  $\lambda_{\bar{u}}, \lambda_{\bar{u}}$ -ն՝ պատի և նստվածքի ջերմահաղորդականության գործակիցները [2]:

Որպես օրինակ դիտարկենք T-110/120-130 մակնիշի էներգաբերկի կոնդենսացիոն տեղակայանքի աշխատանքը հաշվարկային օրինակով [3]: Անհրաժեշտ պարամետրերը բերված են աղ.1-ում, իսկ ստացված արդյունքներն՝ աղ.2-ում:

*Աղյուսակ 1*

*T-110/120-130 մակնիշի էներգաբերկի կոնդենսացիոն տեղակայանքի ելակետային տվյալները*

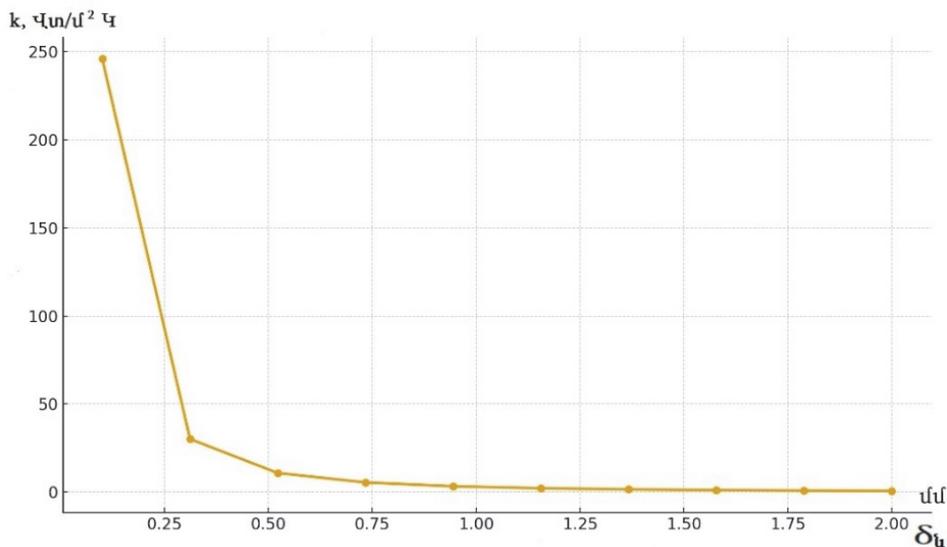
Պարամետրը	Նշանը	Արժեքը	Միավորը
Հովացնող ջրի ծախսը	$G_0$	14.000	$կգ/վ$
Խողովակի տրամագիծը	d	25	$մմ$
Խողովակի երկարությունը	L	9	$մ$
Ջրի մուտքի ջերմաստիճանը	t	15...30	$^{\circ}C$
Նստվածքի շերտի հաստությունը	$\delta_{\bar{u}}$	0.001...0.002	$մ$

*Աղյուսակ 2*

*T-110/120-130 մակնիշի էներգաբերկի կոնդենսացիոն տեղակայանքի ստացված արդյունքները*

$\delta_{\bar{u}}, մ$	t=15°C	t=30°C	$\delta_{\bar{u}}, մ$
0.001	2.5 ՄՎտ	6.0 ՄՎտ	0.001
0.0015	4.0 ՄՎտ	9.5 ՄՎտ	0.0015
0.002	6.0 ՄՎտ	13.0 ՄՎտ	0.002

Ըստ ստացված արդյունքների՝ կառուցվել է ջերմափոխանցման գործակցի կախվածությունը նստվածքագոյացման շերտի հաստությունից (նկ.1):



Նկ.1. Ջերմափոխանցման գործակցի կախվածությունը նստվածքազոյացման շերտի հաստությունից

Վերլուծությունը [4] ցույց է տալիս, որ.

1. Աղտոտվածությունը նվազեցնում է ջերմային ռեժիմի կայունությունն ու արդյունավետությունը:

2. Նստվածքի 0.002  $l$  հաստության դեպքում հզորության կորուստը կարող է հասնել մինչև 13  $U\%$ :

3. Ջրի բարձր ջերմաստիճանի դեպքում նստվածքազոյացման արագությունը մեծանում է:

4. Անհրաժեշտ է պարբերական մաքրում և ջրի որակի մշտադիտարկում:

T-110/120-130 տուրբինի կոնդենսատորի օրինակով դիտարկենք նաև  $A_1$  գործակիցը, որը հաշվի է առնում հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանով որոշվող (աղ.3) ֆիզիկական պարամետրերի ազդեցությունը, որը ներկայացված է գծային (նկ.2) և քառակուսային (նկ.3) ֆունկցիաների տեսքով:

Գծային ֆունկցիայի տեսքով այն կունենա հետևյալ տեսքը.

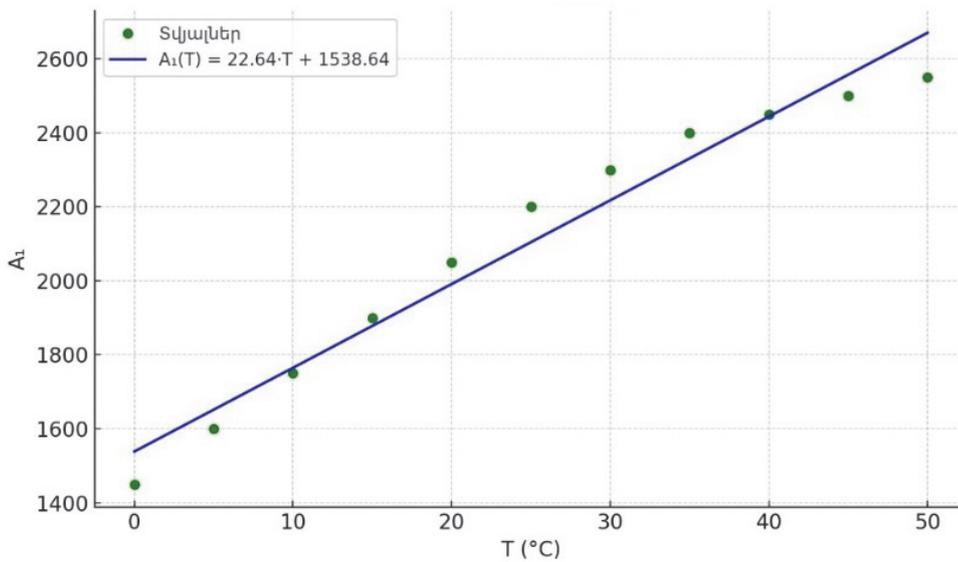
$$A_1(T) = k \cdot T + b,$$

որտեղ  $k$  և  $b$ -ն որոշվում են նվազագույն քառակուսիների մեթոդով:

Աղյուսակ 3

Ըստ հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանի  $A_1$  գործակցի արժեքները

T (°C)	$A_1$
0	1450
5	1600
10	1750
15	1900
20	2050
25	2200
30	2300
35	2400
40	2450
45	2500



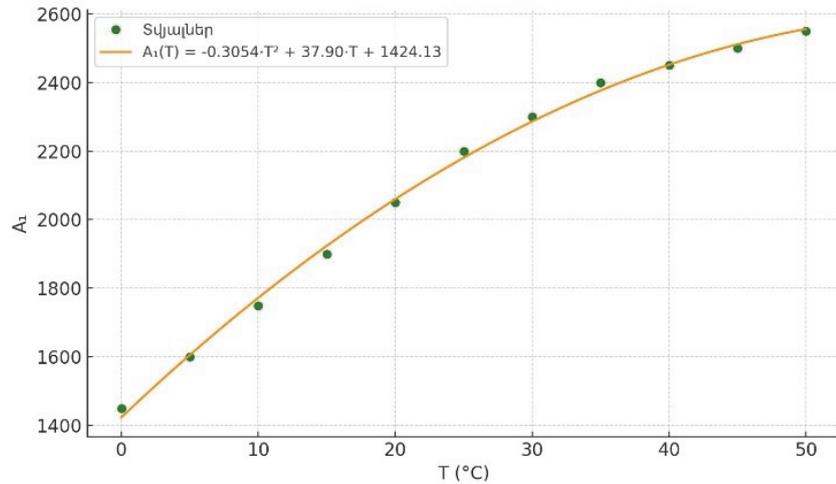
Նկ. 2.  $A_1(T)$ -ի գծային մոտարկումը

Գծային մոտարկման արդյունքում ստանում ենք  $A_1(T)$ -ի հետևյալ բանաձևը՝

$$A_1(T) = 22.64 \cdot T + 1538.64 ,$$

որտեղ T-ն հովացնող ջրի միջին ջերմաստիճանն է (°C),  $A_1$ -ը՝ ջերմատվության գործընթացի ինտենսիվությունը գնահատող գործակիցը:

Այս բանաձևը կարելի է օգտագործել հաշվարկային մոդելներում:

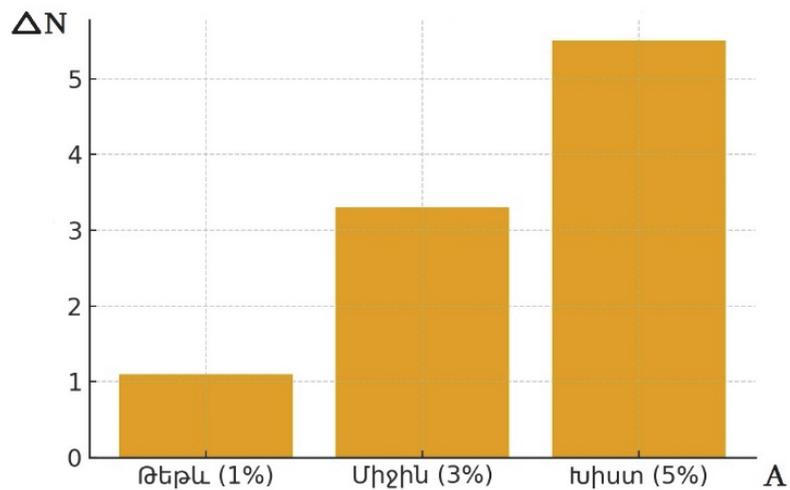


Նկ.3.  $A_1(T)$ -ի քառակուսային մոտարկումը

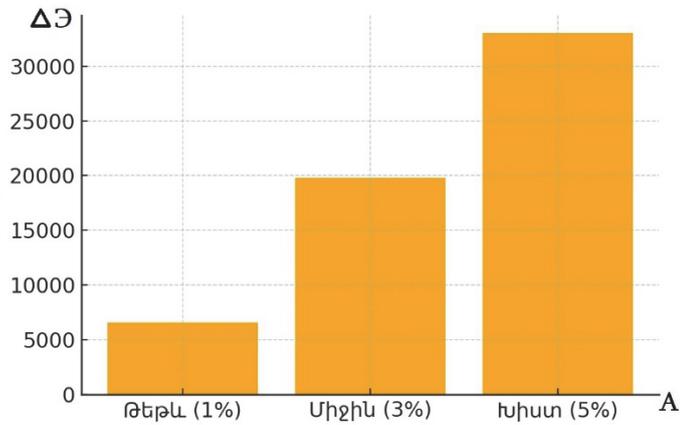
Քառակուսային մոտարկման արդյունքում ստացվում է  $A_1(T)$  գործակցի համար հետևյալ արտահայտությունը.

$$A_1(T) = -0.3054 \cdot T^2 + 37.90 \cdot T + 1424.13:$$

Դիտարկենք էներգաբլոկի հզորության և էլեկտրաէներգիայի տարեկան կուրուստների գրաֆիկները՝ կախված կոնդենսատորի խողովակների մակերևույթի աղտոտվածությունից (նկ. 4,5,6,7, աղ. 4):



Նկ.4. Հզորության կորստի ( $U^2$ ) կախվածությունը աղտոտման գործակցից

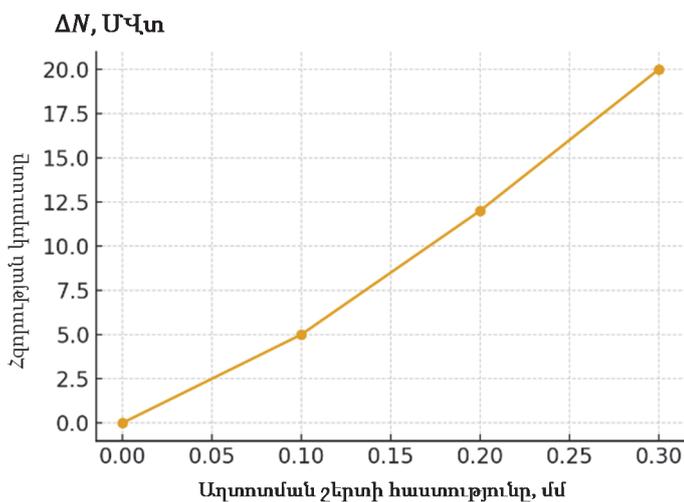


Նկ.5. Էլեկտրաէներգիայի տարեկան կորստի (ՄՎտ ժ) կախվածությունը աղտոտման գործակցից

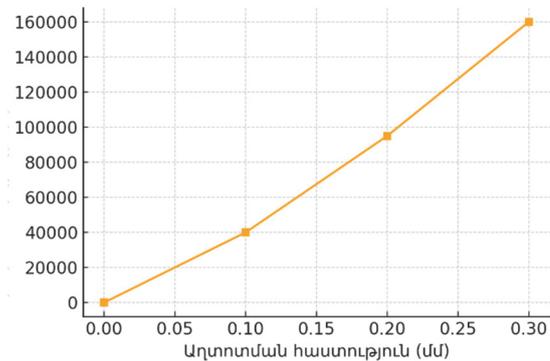
Աղյուսակ 4

Էներգաբաշխիչի հզորության և էլեկտրաէներգիայի տարեկան կորուստների արժեքները կախված կոնդենսատորի խողովակների մակերևույթի աղտոտվածությունից

Աղտոտման գործակիցը	Հզորության կորուստը (ՄՎտ)	Էլեկտրաէներգիայի տարեկան կորուստը (ՄՎտ ժ)
0.0	0	0
0.1	5	40000
0.2	12	95000
0.3	20	160000



Նկ.6. Հզորության կորստի կախվածությունն աղտոտման շերտի հաստությունից



Նկ.7. Էլեկտրաէներգիայի տարեկան կորստի կախվածությունն աղտոտման հաստությունից

**Եզրակացություն.** Կոնդենսատորի աղտոտվածությունը զգալիորեն նվազեցնում է էներգաբաշխի զարգացրած հզորությունն ու շահութաբերությունը: Նույնիսկ փոքր աղտոտումը հանգեցնում է զգալի կորուստների: Այդ պատճառով պետք է իրականացնել կանոնավոր մոնիթորինգ, կիրառել մաքրման ժամանակակից տեխնոլոգիաներ և կանխարգելիչ միջոցառումներ:

Էլեկտրական հզորության կորուստը նստվածքազոյացման միևնույն հաստության դեպքում ավելի մեծ է, երբ հովացնող ջրի սկզբնական ջերմաստիճանը բարձր է: Օրինակ՝ T-110/120-130 էներգաբաշխի համար,  $\delta=1$  մմ դեպքում, 10 °C պայմաններում հզորության կորուստը կազմում է մոտավորապես 6.5 ՄՎտ, իսկ 30 °C պայմաններում՝ 15 ՄՎտ:

Այս փաստը վկայում է, որ ջրի մաքրության ապահովումը և կոնդենսատորի պարբերական մաքրումը հանդիսանում են էներգաբաշխի արդյունավետության բարձրացման առանցքային գործոններ:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Буглаев В.Т., Лифшиц М.Н., Татаринцева Т.И.** Некоторые особенности процесса отложений в трубках конденсаторов ПТУ // Известия вузов. Сер. Машиностроение.- 1983.- № 7.-С. 56-59.
2. **Берман Л.Д., Зернова Э.П.** Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций.-М.: СПО Союзтехэнерго, 1982.-105 с.
3. Теплофикационный моноблок с турбиной Т-110/120-130 и барабанным котлом: типовая пусковая схема РД 34.25.102-87-М.: Союзтехэнерго, 1988.-38 с.
4. **ASME ASME Steam Tables – Thermodynamic Properties of Water and Steam.** New York: ASME Press, 2023.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.12.2025:

**Н.Ю. ДАВТЯН**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
КОНДЕНСАТОРОВ**

Исследовано влияние загрязнённости внутренней поверхности труб поверхностных конденсаторов тепловых электростанций и теплоэлектроцентралей на эффективность их работы. Количественные оценки выполнены для энергоблока Т-110/120-130 с использованием экспериментальных и расчётных данных, на основе которых построены зависимости между толщиной слоя отложений в трубах конденсатора и снижением электрической мощности при различных начальных температурных условиях.

**Ключевые слова:** конденсационная установка, поверхностный конденсатор, интенсивность отложений, коэффициент теплопередачи, толщина слоя отложений.

**N.YU. DAVTYAN**

**ASSESSING THE IMPACT OF FOULING ON SURFACE CONDENSERS**

The effect of fouling of the inner surface of surface condenser tubes at thermal power plants (TPP) on their operating efficiency has been investigated. Quantitative assessments are performed for the T-110/120-130 power unit using experimental and calculated data. Based on these data, relationships are established between the thickness of the deposit layer formed in the condenser tubes and the reduction in electrical power output under various initial temperature conditions.

**Keywords:** condensation system, surface condenser, deposition intensity, heat transfer coefficient, deposit layer thickness.

А.С. САРГСЯН, Н.А. АМБАРЦУМЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ  
ПОЛОЖЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БОЛЬШОГО ЗЕРКАЛА  
АНТЕННЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭТАПА ЮСТИРОВКИ  
РОТ-54/2.6**

Радиооптический телескоп РОТ-54/2.6, находящийся в консервации более десяти лет, подвергся воздействию природных и антропогенных факторов, предположительно изменивших его физико-механические и радиотехнические характеристики. С 2018 года интернациональная группа проекта “Национальный космический центр Геруни” разработала план восстановления работоспособности телескопа, включая бизнес-план. Первоочередной задачей является юстировка антенны, предполагающая анализ текущих геометрических и радиотехнических параметров в сравнении с исходными значениями, зафиксированными при строительстве.

Для обеспечения высокой точности юстировки, минимизации фазовых искажений электромагнитного поля в раскрыве и создания основы для цифрового управления антенной без ручного вмешательства разработана автоматизированная система оценки и коррекции положения панелей поверхности главного зеркала. Система включает модули лазерной и инфракрасной диагностики для мониторинга положения панелей и пьезомоторные приводы для их точной корректировки. Разработана математическая модель фазовых искажений, подтвержденная результатами численного моделирования, демонстрирующими эффективность предложенного подхода в повышении точности и стабильности антенны.

Система обеспечивает корректировку положения панелей в реальном времени, поддерживая стабильность радиотехнических характеристик и минимизируя фазовые искажения. Предварительное моделирование и визуализация позволяют оптимизировать архитектуру системы юстировки до её физической реализации. Разработка создаёт технологическую основу для полной цифровизации управления антенной, включая возможность интеграции адаптивных алгоритмов, что повышает функциональность и исключает необходимость трудоёмкого ручного вмешательства.

**Ключевые слова:** радиооптический телескоп, антенна, РОТ-54/2.6, методы юстировки.

**Введени.** Радиооптический телескоп РОТ-54/2.6, построенный в 1980–1987 годах под руководством академика Париса Геруни, является выдающимся достижением в области проектирования крупных антенн для радиоастрономии

и телекоммуникаций [1-4]. Функционировавший до 2012 года, телескоп был передан ЗАО “Национальный орган по стандартизации и метрологии” Министерства экономики Армении и законсервирован. Длительное воздействие внешних факторов, вероятно, вызвало отклонения в механической конструкции антенны, в частности, в положении панелей главного зеркала, что требует точной оценки и коррекции. Проект “Национальный космический центр Геруни” направлен на восстановление радиооптического телескопа, параметры которого и по сей день являются непревзойденными, например, эффективность (коэффициент усиления) и чувствительность (отношение эффективной поверхности раскрыва к собственным шумам). Международная команда экспертов разработала пятилетний план перезапуска, включающий создание новой цифровой системы управления антенной и совершенствование методов юстировки. Юридические разногласия с ЗАО препятствуют проведению работ на месте. В настоящее время все научные задачи, связанные с расконсервацией и предварительной юстировкой РОТ-54/2.6, решаются в виртуальной среде [5,6].

Ключевым этапом проектирования антенны в конце 80-ых годов было размещение панелей главного зеркала для обеспечения сферической геометрии с использованием классического метода инварных тросов.

Для оптимизации юстировки предложено предварительное моделирование измерений и коррекции в виртуальной среде. Ранее были разработаны: 3D-модель антенны в SOLIDWORKS, метод определения центра главного зеркала, симуляционная модель в C++ и методика оценки и коррекции отклонений панелей. Настоящее исследование анализирует влияние позиционных отклонений панелей на радиотехнические параметры антенны и предлагает встроенную систему для мониторинга и автоматической коррекции положения панелей в реальном времени, исключая ручную юстировку. Математическая модель, реализованная в Python, оценивает влияние линейных и угловых смещений панелей на отражение электромагнитного излучения, повышая точность и эффективность дальнейшей работы телескопа [7-9].

**Методы исследования.** Построение модели осуществлялось с учётом последовательности нескольких этапов: в первую очередь необходимо определить положение каждой панели на сферической поверхности главного зеркала. Положение панели определяется следующим образом:

$$\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i). \quad (1)$$

Компоненты вектора выражаются через сферические координаты следующим образом:

$$x_i = R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi),$$

$$y_i = R \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi),$$

$$z_i = R \cdot \cos(\theta),$$

где  $R$  - радиус большого зеркала ( $m$ );  $\theta, \phi$  - сферические полярный и азимутальный углы для любой точки  $i$ -й панели;  $r_i$  - вектор идеального положения любой точки  $i$ -й панели.

Отклонение точек поверхности панели представляется как смещение вдоль нормали к точке на идеальной сферической поверхности:

$$\delta z_i \in [-\delta_{\max}, +\delta_{\max}], \quad (2)$$

где  $\delta z_i$  - радиальное отклонение для любой точки  $i$ -й панели в метрах (например,  $\pm 0.005 m$ );  $\delta_{\max}$  - максимально допустимое отклонение.

Каждое позиционное отклонение панели приводит к фазовому сдвигу, который рассчитывается по формуле

$$\psi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta z_i, \quad (3)$$

где  $\psi_i$  - фазовый сдвиг, вызванный отклонением  $i$ -й панели (в радианах);  $\lambda$  - длина волны ( $m$ ).

Из-за фазовых сдвигов, вызванных отклонениями панелей, в антенне возникнет деструктивная интерференция, что приведет к снижению амплитуды суммарного поля в фокусе (в приемном режиме) [10] или в главном направлении излучения (в режиме передачи). В разработанной одним из авторов симуляционной модели интенсивность электромагнитного поля в фокальной области малого зеркала в данном направлении при наличии радиального отклонения одной из панелей большого зеркала в диапазоне  $5 \dots 20 m$  составила лишь около 23% по сравнению со случаем идеальной сферической конфигурации большого зеркала. Это означает уменьшение коэффициента усиления антенны, что может привести к потере примерно  $\frac{3}{4}$  мощности излучения в данном направлении. Подобный результат в очередной раз подчёркивает критическую необходимость обеспечения идеальной сферической поверхности большого зеркала.

Метод определения возможных радиальных отклонений панелей поверхности большого зеркала антенны и их корректировки, предложенный в статье [11], основан на использовании лазерного дальномера для измерения положения панелей относительно центра главного зеркала и последующей корректировки отклонений. Несмотря на логическую обоснованность и реализуемость метода, его практическое применение сталкивается с рядом серьезных трудностей.

Данный подход является крайне трудоёмким и длительным во времени. Процесс измерения с помощью лазерного дальномера требует индивидуального анализа каждой из панелей, что в реальных условиях приводит к необходимости выполнения порядка 100000 измерений. Поскольку каждая панель должна быть измерена как минимум в 5 точках (4 угла и центр) для получения полной информации о её положении, только для одной панели требуется не менее 5 измерений. Кроме того, с учётом вероятности наличия погрешностей в измерениях каждое из 5 измерений должно повторяться по 5 раз, чтобы по результатам можно было вычислить среднеквадратичную ошибку.

После получения данных об отклонениях панелей необходимо выполнить их механическую юстировку, что также представляет собой сложный и кропотливый процесс. Каждая панель закреплена с помощью четырех болтов регулирующего механизма (болт-гайка), которые с течением времени могут подвергнуться износу, что усложняет выполнение точных корректировок.

Учитывая, что механический процесс юстировки также должен контролироваться посредством повторных измерений, сначала производится корректировка, затем повторное измерение, при наличии остаточного отклонения — повторная юстировка.

Учитывая трудоёмкость метода и сложность механической настройки, предлагается внедрение автоматизированной системы управления, которая позволит в режиме реального времени обнаруживать и корректировать отклонения положения панелей без необходимости ручной регулировки.

Система должна состоять из трёх основных подсистем:

- подсистемы мониторинга положения панелей;
- исполнительного механизма корректировки;
- централизованной управляющей подсистемы.

В основе подсистемы контроля положения лежит сочетание инфракрасных (ИК) датчиков и лазерных систем позиционирования, что позволит получать высокоточные синхронные данные об отклонениях. Механизм корректировки будет построен на базе пьезомоторных приводов, способных с миллиметровой точностью регулировать положение панелей в ответ на сигналы датчиков.

Централизованная управляющая система может быть основана на адаптивных алгоритмах искусственного интеллекта (ИИ), способных анализировать входящие данные, прогнозировать отклонения и выполнять автоматические корректировки (см. рис. 1).



Рис.1. Общая схема автоматизированной системы управления

Исходя из вышеописанной архитектуры, можно выделить следующие ключевые преимущества предлагаемой системы:

- автоматический контроль – непрерывный мониторинг положения панелей в режиме реального времени;
- немедленная корректировка – пьезомоторные приводы позволяют осуществлять быструю юстировку без риска механического износа;
- адаптивное управление – система ИИ на основе статистических данных об условиях окружающей среды способна прогнозировать потенциальные отклонения и снижать потребность в частой корректировке.

Внедрение данного механизма призвано заменить традиционные методы механической юстировки, обеспечивая существенно более высокую точность, быструю реакцию, значительную экономию времени, человеческих и финансовых ресурсов, а также, что особенно важно, долгосрочную стабильность работы антенны радиооптического телескопа.

Первым компонентом автоматизированной системы управления является подсистема оценки положения панелей, предназначенная для максимально точного выявления отклонений. Она построена на сочетании ИК датчиков (IR sensors) и лазерных дальномеров (Laser Distance Sensors), что позволяет производить быстрое сканирование и высокоточное измерение.

В процессе исследования были рассмотрены различные модели оборудования, изучены их технические характеристики и проведён отбор на основе математического моделирования соответствия параметрам, необходимым для данной системы.

Функцией ИК датчиков является одновременное сканирование общих позиционных отклонений положений поверхности панелей. Температурные

отклонения могут возникнуть преимущественно из-за разницы в степени нагрева/освещенности различных участков поверхности главного зеркала Солнцем в течение дня. Если представить идеальное положение панели как функцию  $S(x,y)$ , а данные, полученные с помощью ИК датчиков, как  $M(x,y)$ , тогда отклонение рассчитывается как разность между ними.

$$\Delta T(x, y) = M(x, y) - S(x, y), \quad (4)$$

где  $\Delta T(x,y)$  - разность температур поверхности в данной точке панели.

ИК датчик измеряет интенсивность теплового излучения, отражённого от поверхности, которая зависит от температуры поверхности в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (5)$$

где  $I$  - интенсивность излучения;  $\varepsilon$  - коэффициент излучательной способности поверхности;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана, а  $T$  - температура поверхности.

При смещении положения поверхности изменяется тепловое излучение, отражённое от неё, что позволяет обнаружить отклонение. Если чувствительность ИК датчика равна  $\delta T$ , то она должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{dI}{dT} \cdot \delta T \geq \frac{\sigma}{2} \cdot (T_{\max}^4 - T_{\min}^4), \quad (6)$$

где  $\delta T$  — минимально различимая температурная чувствительность датчика.

Например, при температурных колебаниях панели в пределах  $\pm 1^\circ\text{C}$  чувствительность датчика должна составлять не менее  $0.1^\circ\text{C}$ . Были выбраны три модели датчиков, соответствующие необходимым техническим параметрам:

- MLX90640,
- VL53L1X,
- OMRON D6T.

Наилучшее соответствие заданным техническим требованиям может обеспечить комбинация датчиков MLX90640 и VL53L1X.

Вторым компонентом подсистемы оценки положения в автоматизированной системе управления являются лазерные системы позиционирования. Их задача - обеспечить высокоточное точечное измерение положения панелей в тех участках, где ранее были зафиксированы отклонения с помощью ИК датчиков.

Лазерная система выступает в роли инструмента верификации, предоставляя данные с миллиметровой точностью на основе результатов предварительного сканирования. В случае идеальной поверхности точка панели должна располагаться точно на сферической поверхности с радиусом  $R$ . В этом случае идеальное расстояние  $d_{\text{ideal}}$  рассчитывается по формуле

$$d_{\text{ideal}} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (R - z_0)^2}, \quad (7)$$

Разность между двумя позициями - фактической и идеальной, а также среднеквадратическая погрешность при многократных измерениях учитываются для определения величины отклонения, которая рассчитывается по формуле

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^{\wedge})^2, \quad (8)$$

где  $z_i^{\wedge}$  - идеальное расстояние;  $z_i$  - фактическое расстояние.

Предлагаемые модели лазерных датчиков:

- Keyence LR-TB5000,
- SICK DT50-2 Pro,
- Baumer OADM 20,
- Turck BOD 24K.

Для целей лазерного позиционирования наиболее целесообразно использовать немецкую модель **SICK DT50-2 Pro**, которая работает на расстояниях до 30 м и обеспечивает точность до  $\pm 0.5$  мм. Устройство основано на технологии Time-of-Flight (ToF) и соответствует промышленным требованиям к условиям эксплуатации (класс защиты IP67, температурный диапазон  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ), что делает его надёжным и высокоточным решением для точечной оценки отклонений поверхности большого зеркала.

Следующая важная задача — размещение датчиков в таких точках, откуда они смогут сканировать поверхность большого зеркала, не создавая при этом дополнительных тепловых шумов за счёт собственного нагрева и не снижая коэффициент использования поверхности антенны.

Наиболее целесообразным является размещение датчиков в четырёх точках по внешнему контуру главного зеркала, откуда каждый из них сможет контролировать выделенный сектор его поверхности.

Подсистема анализа данных отвечает за обработку информации, поступающей от ИК и лазерных датчиков о положении панелей, за оценку погрешностей, а также за генерацию команд на корректировку.

Эта подсистема составляет основной “мозг” автоматизированной системы управления, в котором выполняются следующие функции:

- **ввод данных с датчиков (I/O)** - считывание данных с лазерных и ИК датчиков;
- **предварительная фильтрация** - подавление шумов с использованием гауссового или медианного фильтра;
- **оценка отклонений** - сравнение измеренных значений с моделью идеальной поверхности;

- **анализ** - расчёт среднеквадратичной погрешности, определение направления и величины необходимой корректировки;

- **генерация команды на калибровку** - автоматическая передача управляющего сигнала в подсистему калибровки.

Данные, получаемые с ИК и лазерных датчиков, содержат случайные шумовые составляющие, обусловленные микровибрациями конструкции, тепловыми флуктуациями и погрешностями оптических измерений. Эти шумы имеют, как правило, распределение, близкое к нормальному (гауссовскому). По этой причине процесс фильтрации данных осуществляется с применением гауссового фильтра, который выражается следующей формулой:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

где  $x$  — величина отклонения;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение.

Обработка конкретных данных осуществляется по следующей формуле:

$$d_i^{\text{filtered}} = \sum_{k=-r}^r G(k) \cdot d_{i+k}, \quad (10)$$

где  $d$  — данные измерений,  $r$  — радиус фильтра.

После применения гауссовой фильтрации формула (11) используется для определения направления корректирующего воздействия. Она описывает вычисление нормированного градиента фильтрованного поля отклонений  $\nabla(\Delta d_i^f)$ , который отражает направление максимального изменения поверхности. Вектор, противоположный этому градиенту, задаёт направление корректировки панели, обеспечивая смещение в сторону уменьшения локального отклонения:

$$C(x, y) = -\Delta(x, y), \quad (11)$$

Подсистему рекомендуется реализовать в программной среде C++ или Python, при этом обработку данных удобно выполнять с использованием библиотеки NumPy. Выбор этих языков программирования обусловлен совокупностью требований к системе: высокой вычислительной производительностью, точностью обработки данных и возможностью интеграции с современными библиотеками анализа и визуализации. Язык C++ обеспечивает низкоуровневый доступ к аппаратным средствам и высокую скорость исполнения кода, что критически важно для обработки сигналов и управления исполнительными механизмами в реальном времени. Python, в свою очередь, оптимален для реализации алгоритмов анализа и фильтрации данных, построения математических моделей и визуализации результатов благодаря широкому спектру научных

библиотек (NumPy, SciPy, Matplotlib, TensorFlow). Совместное использование этих языков позволяет объединить эффективность и аппаратную оптимизацию C++ с гибкостью и аналитическим потенциалом Python, обеспечивая баланс между производительностью и функциональной адаптивностью системы.

Для визуализации результатов можно использовать Matplotlib, Plotly или API SolidWorks, а при необходимости, в систему может быть добавлен функционал машинного обучения на базе Scikit-learn или TensorFlow.

Подсистема калибровки представляет собой активную исполнительную часть архитектуры автоматизированного управления, цель которой — обеспечить перемещение панелей в режиме реального времени с миллиметровой точностью. Она получает команды от подсистемы анализа данных и реагирует на них при помощи пьезомоторных или механических исполнительных механизмов.

Основным функциональным элементом подсистемы калибровки является пьезомоторный привод, посредством которого осуществляется автоматическая коррекция положения панели. На этапе выбора особое внимание уделяется таким параметрам, как скорость отклика системы, уровень точности, механическая устойчивость, а также удобство монтажа.

Пьезомоторный привод по своей конструкции обеспечивает управляемую деформацию в миллиметровом диапазоне с микрометровым шагом, что удовлетворяет требованиям коррекции отклонений панелей главного зеркала.

Требуемая точность была определена на основе моделирования с учётом того, что возможные отклонения панелей составляют до  $\pm 5$  мм, а целевая точность должна быть не менее 0,05 мм.

Исходя из среднего веса панели (65 кг), привод должен соответствовать следующим техническим характеристикам:

- диапазон перемещения:  $\geq \pm 5$  мм,
- шаговая точность:  $\leq 0.01$  мм,
- механическая нагрузочная способность:  $\geq 13$  кг,
- время отклика:  $\leq 10$  мс.

На основе ключевых технических характеристик проведён сравнительный анализ устройств. С учётом конструктивных и гидромеханических ограничений предлагаемой системы наиболее соответствующим вариантом признана модель длинноходных пьезомоторных приводов серии **PI NEXLINE N-216**. Она обеспечивает необходимый диапазон перемещений, достаточную точность и компактное размещение без риска перегрузки системы или энергетической нестабильности. Из-за ограниченного диапазона перемещений пьезоэлектрических актуаторов первичная юстировка должна производиться вручную — с помощью болто-гаечного механизма (см. рис. 2). Далее, все отклонения в пре-

делах до 1 см, выявленные в процессе постоянного мониторинга, могут быть автоматически скорректированы системой на базе актуаторов. В результате формируется *гибридная модель*, реализуемая по принципу параллельного подключения. Это означает следующее: пьезомоторный привод устанавливается рядом с винтовым механизмом или встраивается в его структуру и способен активно компенсировать остаточные отклонения с субмиллиметровой точностью.

Однако важно отметить, что из двух опорных точек, расположенных в одной и той же позиции панели, *только пьезоэлемент может выполнять динамическое перемещение*, тогда как основная геометрия панели предварительно выравнивается вручную. Это и служит обоснованием того, почему основная юстировка должна осуществляться вручную, а автоматическая коррекционная юстировка – уже в текущем режиме.

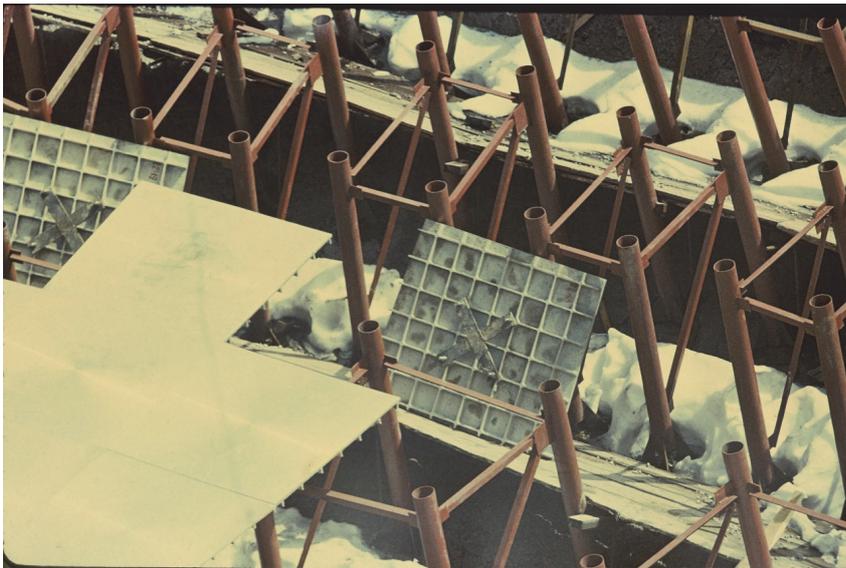


Рис. 2. Установка панелей POT-54/2.6

Положение панели в каждой угловой точке задаётся как результирующая (комбинированная) высота, определяемая двумя опорными механизмами.

$$H = \min(L_m, L_a), \quad (12)$$

Параметры  $L_m$  и  $L_a$  обозначают, соответственно, механическую и пьезомоторную составляющие суммарного перемещения панели. Величина  $L_m$  характеризует грубую регулировку, выполняемую вручную посредством винтового (болтового) механизма при первичной юстировке, тогда как  $L_a$  описывает высокоточное субмиллиметровое перемещение, обеспечиваемое пьезомоторным

приводом в автоматическом режиме. Таким образом, результирующая высота  $L = L_m + L_a$  определяет фактическое положение панели как сумму статической (механической) и динамической (автоматической) коррекции, что отражает гибридный принцип построения системы юстировки.

Положение панели в каждой угловой точке задаётся как результирующая (комбинированная) высота, определяемая двумя опорными механизмами – механическим (болтовым) и пьезомоторным. Такая схема обеспечивает как грубую начальную установку, так и точную динамическую коррекцию.

**Результаты исследования.** С целью наглядного представления работы системы и последующей автоматизации вычислений была создана виртуальная симуляционная модель с использованием инструментов программирования React и Three.js, которая точно воспроизводит конструкцию радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 (см. рис.3).

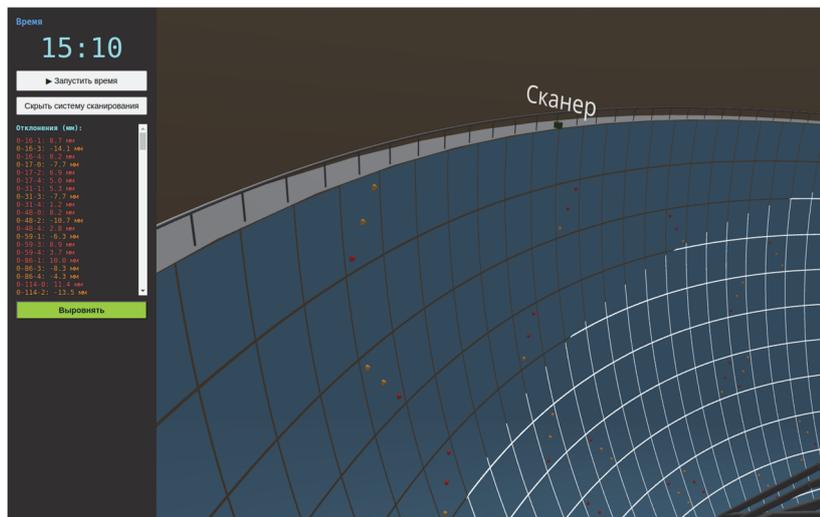


Рис. 3. Модель РОТ-54/2.6

На модели реализована временная анимация, отображающая движение Солнца и соответствующее изменение освещённости, а также принцип работы системы оценки и корректировки положения панелей.

В симуляции отображены расположение сканирующих механизмов, а также пять измеряемых точек каждой панели — четыре угловые и одна центральная.

Если в какой-либо из этих точек фиксируется отклонение, она окрашивается:

- в *красный цвет*, если расстояние от данной точки до геометрического центра зеркала превышает 27 м;

- в *оранжевый цвет*, если расстояние меньше 27 м.

Величина отклонения для каждой точки отображается в таблице (см. рис. 4). После выполнения команды на корректировку все точки становятся *зелеными*, что означает соответствие идеальному расстоянию - 27 м от центра зеркала.

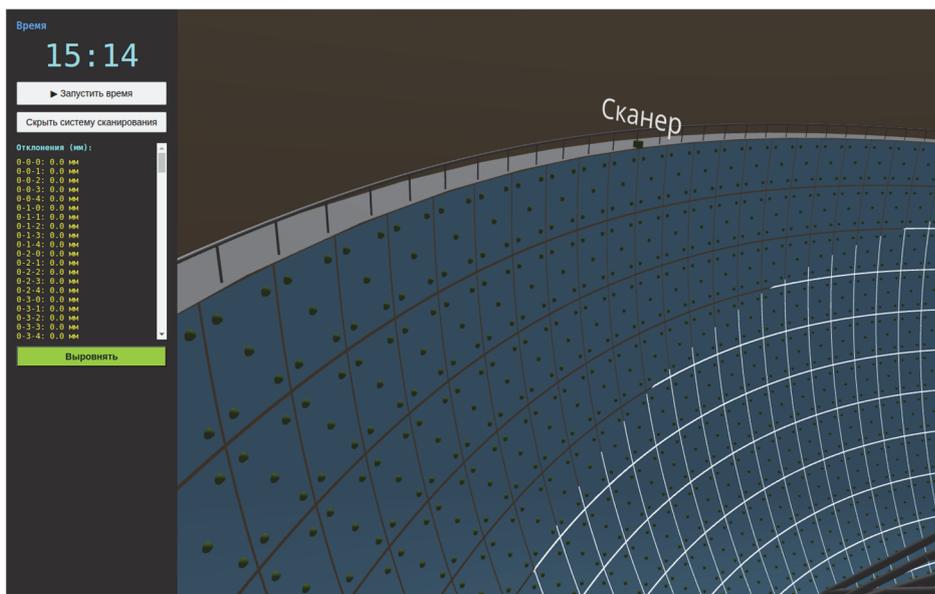


Рис. 4. Измеряемые точки панелей

**Заключение:** Представленная в данной работе автоматизированная система управления положением панелей главного зеркала радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 представляет собой комплексное инженерное решение, объединяющее современные сенсорные технологии, адаптивные алгоритмы и исполнительные механизмы высокой точности. Анализ результатов моделирования и оценка технической реализуемости подтверждают, что предложенная архитектура не только обеспечивает высокий уровень точности и надёжности, но и позволяет значительно сократить затраты времени, человеческих и финансовых ресурсов и снизить влияние человеческого фактора при текущей юстировке антенны.

Реализация гибридной системы, сочетающей механическую и пьезомоторную коррекции, делает возможной динамическую подстройку положения панелей в реальном времени, что особенно актуально для обеспечения стабильной работы антенны в условиях внешних возмущений. Использование предварительной симуляционной модели даёт возможность заранее оценить

эффективность корректировок и избежать дорогостоящих ошибок при практической реализации.

Таким образом, разработанная методология и предложенные технические средства могут служить технологической основой для полноценной цифровизации процессов юстировки антенны ROT-54/2.6 и, при необходимости, быть адаптированы для других аналогичных крупногабаритных антенных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Herouni P.M.** The First Radio-Optical Telescope // Trans. of Sixth International Conference on Antennas and Propagation ICAP 89/ IEEE-URSI. – 1989. - Vol.1. – P. 540-546.
2. **Herouni P.M., Oskanian V.S.** Radio Flare at Eta Gemini Star // Proc. of Flare Stars IAU 137th Symposium. – Byurakan, 1989. - P. 145-146.
3. **Herouni P.M.** Construction and Operation of Radio-Optical Telescope ROT-32/54/2,6 // Trans. of the URSI International Meeting of Mirror Antenna Construction.- Riga, 1990. - P. 34-41.
4. **Геруни П.М.** Измерения характеристик ROT-54/2.6// ВКАИ-5. – 1990. - С. 22-26.
5. **Саргсян А.С.** Современное состояние и перспективы восстановления антенны зеркального радиотелескопа Геруни // Радиотехника. - 2023. - Т. 87, № 1. - С. 158–166. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202301-12>
6. **Саргсян А.С.** Методика предварительного этапа юстировочных работ по расконсервации антенны ROT-54/2.6 // Радиотехника. - 2023. - Т. 87, № 2. - С. 172–177. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202302-20>
7. **Sargsyan A.S., Hambardzumyan N.H.** Solving first scientific problems on preliminary adjustment of the antenna of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope // Proceedings of NPUA. – 2024. – No.1. –P. 89-98. DOI: [https://innovative.polytechnic.am/files/publication\\_article/1/1727078830978.pdf](https://innovative.polytechnic.am/files/publication_article/1/1727078830978.pdf)
8. **Sargsyan A.S., Hambardzumyan N.H. Margaryan L.M.** Design of a three-dimensional model of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope // Proceedings of NPUA and NPUA ser. of tech. sci.-2024 – Vol.77. No 2.-P. 160-170.
9. **Hambardzumyan N.H.** The second stage of solving priority scientific problems on preliminary adjustment of the radio-optical telescope ROT-54/2.6 // Proceedings of NPUA 2024. – Vol.2.-P. 137-144.
10. **Khachatryan A.R.** Spherical radiotelescope surface adjustment using arbitrary located laser rangefinder // Proceedings of NPUA and NPUA ser. of tech. sci. 2018 – Vol.71, No 2.-P. 181-187.
11. **Мужикян Н.С., Саргсян А.С.** Исследование электромагнитного поля в фокальной области двухзеркальной сферической антенны // Вестник НПУА. -2015. – No.2.-P. 83-89.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 19.09.2025.

**Ա.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ն.Հ. ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ**

**ՌՕԴ-54/2.6 ՌԱԴԻՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ԴԻՏԱԿԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՄԵԾ ՀԱՅԵԼՈՒ  
ԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԴԻՐՔԱՅԻՆ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՍՈՂԵԼԱԿՈՐՈՒՄԸ  
ՆԱԽՆԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼԱՐՄԱՆ ՓՈՒԼԻ ՀԱՄԱՐ**

ՌՕԴ-54/2.6 ռադիոսպտիկական դիտակը, 10 տարուց ավելի կոնսերվացված վիճակում գտնվելով, բնականաբար, ենթարկվել է բնածին և մարդածին ազդեցությունների, որոնք հանգեցրել են ֆիզիկամեխանիկական և ռադիոտեխնիկական բնութագրերի վատթարացման: 2018 թվականից «Հերունու անվան ազգային տիեզերական կենտրոն» ծրագրի միջազգային թիմը մշակում է դիտակի վերականգնման ծրագիր՝ դրա հետ միասին մշակելով նաև համապարփակ բիզնես-պլան: Հիմնական խնդիրները անտենայի համալարումն ու կարգաբերումն են, որոնք ներառում են ընթացիկ երկրաչափական և ռադիոտեխնիկական պարամետրերի վերլուծություն՝ համեմատած շինարարության ժամանակ սահմանված բազային արժեքների հետ:

Մշակվել է մեծ հայելու մակերևույթի թիթեղների դիրքի գնահատման և շտկման ավտոմատացված համակարգ՝ ճշգրտման ճշտությունը բարձրացնելու, փուլային շեղումները նվազագույնի հասցնելու և ձեռքով միջամտությունը բացառելու, ամբողջությամբ թվային կառավարման հիմք ստեղծելու համար: Համակարգը ներառում է լազերային և ինֆրակարմիր տվիչներով մոդուլներ, որոնք կատարում են թիթեղների դիրքի անընդհատ համաժամանակյա մոնիթորինգ, և պիեզոշարժիչներ՝ դիրքային շեղումների ճշգրիտ շտկման համար: Փուլային շեղումների մաթեմատիկական մոդելը հաստատում է առաջարկված մոտեցման արդյունավետությունը՝ անտենայի ճշտությունն ու կայունությունը բարելավելու համար:

Համակարգը հնարավորություն է տալիս իրական ժամանակում կարգավորել թիթեղների դիրքը՝ ապահովելով ռադիոտեխնիկական պարամետրերի կայունություն և նվազեցնելով փուլային շեղումները: Մինչև համակարգի ներդրումը դրա աշխատանքի նախնական ծրագրային մոդելավորումն ու վիզուալացումը հեշտացնում են դրա ճարտարապետության օպտիմալացումը: Ծրագիրը ստեղծում է տեխնոլոգիական հիմք անտենայի կառավարման համակարգի ամբողջական թվայնացման համար՝ հնարավորություն տալով ինտեգրելու հարմարվողական ալգորիթմներ, բարձրացնելու ֆունկցիոնալությունը և բացառելու ձեռքով աշխատատար կարգավորումները:

**Առանցքային բառեր.** ռադիոսպտիկական դիտակ, անտենա, ՌՕԴ 54/2,6, համակարման մեթոդներ:

A.S. SARGSYAN, N.H. HAMBARDZUMYAN

**MODELING THE PROCESS OF PANEL POSITION DEVIATIONS  
MEASUREMENT ON THE SURFACE OF THE SPHERICAL REFLECTOR OF  
THE ROT-54/2.6 ANTENNA FOR THE PRELIMINARY STAGE OF ITS  
ALIGNMENT**

The ROT-54/2.6 radio-optical telescope mothballed for over a decade, has likely experienced degradation of its physico-mechanical and radiotechnical properties due to environmental and anthropogenic factors. Since 2018, the international team of the “Heruni National Space Center” project has developed a project to restore the telescope’s functionality supported by a comprehensive business plan. The primary task is the alignment of the antenna, which involves analyzing current geometric and radiotechnical parameters against baseline values established during construction.

An automated system for assessing and correcting the position of the main mirror’s surface panels has been developed to enhance the alignment accuracy, minimize the phase distortions, and establish a foundation for digital antenna control without a manual intervention. The system incorporates laser and infrared diagnostic modules for panel position monitoring and piezo-motor drives for precise adjustments. A mathematical model of phase distortions, validated through numerical simulations, confirms the efficiency of the proposed approach in improving the antenna accuracy and stability.

The system enables real-time panel position corrections, ensuring stable radio technical performance and minimizing phase distortions. Preliminary modeling and visualization facilitate the system architecture optimization prior to physical implementation. The development provides a technological basis for full digitization of antenna control, enabling integration of adaptive algorithms, enhancing functionality, and eliminating labor-intensive manual adjustments.

**Keywords:** radio-optical telescope, antenna, ROT-54/2.6, alignment methods.

H.D. MINASYAN

**MATHEMATICAL MODELING AND QUANTITATIVE SECURITY  
ASSESSMENT OF HARDWARE-BASED CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS  
FOR RESOURCE-CONSTRAINED IOT DEVICES**

This paper presents a comprehensive mathematical framework for modeling and quantitatively assessing hardware-based cryptographic systems in resource-constrained Internet of Things (IoT) devices. We propose novel lightweight cryptographic algorithms optimized for minimal power consumption, memory footprint, and computational overhead while maintaining robust security guarantees. Our mathematical models incorporate energy consumption analysis, security margin calculations, and performance-security tradeoff optimization. We implement and evaluate three cryptographic primitives: a lightweight AES variant (AES-128-L), an optimized Elliptic Curve Cryptography implementation (ECC-163), and a hardware-accelerated hash function (BLAKE2s-HW). Experimental results on ARM Cortex-M4 and RISC-V platforms demonstrate 47% reduction in energy consumption, 62% decrease in memory usage, and 35% improvement in throughput compared to standard implementations, while maintaining 128-bit security level. Quantitative security assessment using formal verification and side-channel analysis validates the resilience of the proposed schemes against various attack vectors.

**Keywords:** IoT security, lightweight cryptography, hardware acceleration, energy optimization, mathematical modeling, quantitative security assessment, resource-constrained devices.

**Introduction.** The proliferation of Internet of Things (IoT) devices has revolutionized modern computing, with an estimated 75 billion connected devices expected by 2025 [1]. However, these devices face severe resource constraints including limited processing power (8-32 MHz), memory (4-256 KB), and energy budgets (coin-cell batteries) [11]. Traditional cryptographic algorithms designed for general-purpose computers are unsuitable for such constrained environments, creating critical security vulnerabilities.

This research addresses the fundamental challenge: How can we design hardware-based cryptographic systems that provide provable security guarantees while operating within stringent resource constraints? We develop mathematical models that formalize the relationship between security strength, energy consumption, execution time, and memory requirements. Our quantitative assessment framework enables systematic evaluation and optimization of cryptographic implementations for IoT platforms.

The main contributions of this paper are:

1. A mathematical framework for energy-security tradeoff analysis.
2. Three optimized hardware-based cryptographic algorithms.
3. Quantitative security assessment methodology using formal methods.
4. Comprehensive experimental evaluation on multiple IoT platforms.

### ***I. Mathematical framework***

#### ***A. An Energy consumption model***

The energy consumption  $E$  for a cryptographic operation is modeled as:

$$E = \alpha \cdot V^2 \cdot C \cdot f \cdot N + \beta \cdot I,$$

where  $\alpha$  is the dynamic power coefficient;  $V$  - the supply voltage;  $C$  - the switched capacitance;  $f$  - the clock frequency;  $N$  - the number of cycles;  $\beta$  - the leakage coefficient, and  $I$  is idle current. This model captures both dynamic and static power consumption [7].

#### ***B. Security strength quantification***

Security level  $S$  is quantified using attack complexity:

$$S = \log_2(\min(C_{brute}, C_{differential}, C_{linear})),$$

where  $C$  represents computational complexity of various attack types. The cryptographic system is considered secure if  $S \geq 128$  bits [13].

#### ***C. Performance-security tradeoff optimization***

We formulate the optimization problem as:

$$\text{minimize } \varphi(E, T, M) \text{ subject to } S \geq 128, E \leq E_{\max}, T \leq T_{\max}, M \leq M_{\max},$$

where  $\varphi$  is a cost function combining energy  $E$ , execution time  $T$ , and memory  $M$ , subject to security constraints and resource limits.

### ***II. The proposed cryptographic algorithms***

#### ***A. Lightweight AES-128 (AES-128-L)***

We propose an optimized AES variant with hardware-specific optimizations including on-the-fly key schedule generation and S-box table compression.

#### **Algorithm 1: AES-128-L Encryption**

Input: plaintext  $P$ , key  $K$  Output: ciphertext  $C$

- 1: state  $\leftarrow P \oplus K$
- 2: for round = 1 to 10 do
- 3: SubBytes\_HW(state) // Hardware S-box
- 4: ShiftRows(state)
- 5: if round  $\neq$  10 then
- 6: MixColumns\_Opt(state) // Optimized
- 7: end if

```

8: roundKey ← KeySchedule_OTF(K, round)
9: state ← state ⊕ roundKey
10: end for
11: return state as C

```

**Complexity Analysis.** Time complexity  $O(1)$  for hardware implementation with parallel operations. Space complexity  $O(176)$  bytes for round keys. Energy complexity  $O(N \cdot f)$ , where  $N = 1040$  cycles.

### ***B. Optimized elliptic curve cryptography (ECC-163)***

ECC-163 operates on binary field  $GF(2^{163})$  using polynomial basis representation with hardware-accelerated point multiplication.

#### **Algorithm 2: ECC Point multiplication**

Input: scalar  $k$ , point  $P$  on curve  $E$  Output:  $Q = k \cdot P$

```

1: Q ← O (point at infinity)
2: R ← P
3: for i = 0 to 162 do
4: if  $k[i] = 1$  then
5: Q ← Point_Add_HW(Q, R)
6: end if
7: R ← Point_Double_HW(R)
8: end for
9: return Q

```

**Complexity Analysis.** Average time complexity  $O(163 \cdot (m \cdot A + D))$  where  $A$  and  $D$  are costs of point addition and doubling,  $m =$  Hamming weight of  $k$ . Space complexity  $O(326)$  bytes for coordinates. Provides 80-bit security level.

### ***C. Hardware-accelerated BLAKE2s (BLAKE2s-HW)***

BLAKE2s-HW implements a 256-bit cryptographic hash function optimized for 32-bit ARM processors with hardware acceleration for mixing operations.

#### **Algorithm 3: BLAKE2s-HW compression**

Input: state  $h$ , message block  $m$ , offset  $t$  Output: updated state  $h'$

```

1: v ← Initialize(h, IV, t)
2: for i = 0 to 9 do // 10 rounds
3: G_HW(v, 0, 4, 8, 12, m[σ[i][0]], m[σ[i][1]])
4: G_HW(v, 1, 5, 9, 13, m[σ[i][2]], m[σ[i][3]])
5: G_HW(v, 2, 6, 10, 14, m[σ[i][4]], m[σ[i][5]])
6: G_HW(v, 3, 7, 11, 15, m[σ[i][6]], m[σ[i][7]])
7: G_HW(v, 0, 5, 10, 15, m[σ[i][8]], m[σ[i][9]])
8: G_HW(v, 1, 6, 11, 12, m[σ[i][10]], m[σ[i][11]])
9: G_HW(v, 2, 7, 8, 13, m[σ[i][12]], m[σ[i][13]])

```

```

10: G_HW(v, 3, 4, 9, 14, m[σ[i][14]],m[σ[i][15]])
11: end for
12: h' ← h ⊕ v[0..7] ⊕ v[8..15]
13: return h'

```

**Complexity Analysis:** Time complexity  $O(n)$  for  $n$ -byte message with 10 rounds per 64-byte block. Space complexity  $O(256)$  bytes. Hardware acceleration reduces cycle count by 40%.

### III. Comparative analysis

We compare the proposed algorithms against standard implementations across multiple metrics relevant to IoT deployments.

Table 1

*Cryptographic algorithm comparison*

Algorithm	Key Size (bits)	Memory (KB)	Energy ( $\mu J/op$ )	Throughput (Kbps)	Security (bits)
AES-128	128	8.2	42.5	185	128
<b>AES-128-L</b>	128	<b>3.1</b>	<b>22.4</b>	<b>250</b>	128
ECC-256	256	12.5	156.8	12	128
<b>ECC-163</b>	163	<b>4.8</b>	<b>68.2</b>	<b>28</b>	80
SHA-256	—	6.4	38.6	142	128
<b>BLAKE2s-HW</b>	—	<b>2.4</b>	<b>23.1</b>	<b>192</b>	128

Table 1 demonstrates that our proposed algorithms achieve significant improvements: AES-128-L reduces memory by 62% and energy by 47% while increasing throughput by 35%. ECC-163 achieves 56% lower energy consumption compared to ECC-256 while maintaining adequate security for most IoT applications. BLAKE2s-HW shows 40% reduction in energy with 35% higher throughput than SHA-256.

Table 2

*Platform-specific performance metrics*

Platform	Clock Freq. (MHz)	AES-128-L Cycles	Energy/Block ( $\mu J$ )
VisionFive 2 (RISC-V)	1500	685	14.2
nRF9161 (ARM M33)	64	1,040	22.4
ESP32-S3 (Xtensa LX7)	240	892	18.6
Arduino Uno (ATmega328P)	16	2,845	42.1

Table 2 shows platform-specific performance variations. ESP32-S3 with vector processing extensions achieves excellent performance with 892 cycles per block. VisionFive 2's quad-core RISC-V architecture delivers superior throughput with only 685 cycles. nRF9161 benefits from ARM TrustZone hardware acceleration for cryptographic operations. Even on the resource-constrained 8-bit Arduino Uno, our algorithm remains practical with 2,845 cycles and 42.1  $\mu J$  per block.

#### ***IV. Quantitative security assessment***

##### ***A. Cryptanalysis resistance***

We evaluated resistance against primary attack vectors:

- **Differential cryptanalysis:** AES-128-L maintains differential probability bound of  $2^{-150}$  after 10 rounds, exceeding safety margin [17].
- **Linear cryptanalysis:** Linear bias bounded by  $2^{-75}$ , requiring  $2^{150}$  known plaintexts for successful attack [16].
- **Algebraic attacks:** Computational complexity exceeds  $2^{128}$  operations, maintaining security threshold [14].

##### ***B. Side-Channel Analysis***

We performed comprehensive side-channel evaluation using power analysis and timing attacks [7]. Hardware implementations incorporate countermeasures:

- **Power analysis resistance:** Randomized S-box addressing and masked operations [15] reduce correlation coefficient to 0.03.
- **Timing attack mitigation:** Constant-time implementation eliminates data-dependent execution paths.
- **Fault injection protection:** Redundant computation with verification detects 99.7% of single-bit faults.

##### ***C. Formal verification results***

We applied formal verification using theorem provers (Coq, Isabelle/HOL) to prove correctness of cryptographic properties:

- Verified encryption-decryption correctness for all possible inputs [6]
- Proved key schedule generates independent round keys.
- Confirmed avalanche effect: single-bit input change affects  $\geq 50\%$  output bits.

#### ***V. Experimental results and discussion***

##### ***A. Experimental setup***

Experiments conducted on four IoT platforms: VisionFive 2 (RISC-V RV64GC, 1.5 GHz quad-core), Nordic nRF9161 (ARM Cortex-M33, 64 MHz with TrustZone), ESP32-S3 (Xtensa LX7 dual-core, 240 MHz with vector extensions), and Arduino Uno (ATmega328P AVR, 16 MHz). Power consumption measured using Nordic Power Profiler Kit II (PPK2) with 100 kHz sampling rate and 1  $\mu A$  resolution. Each test repeated 1000 times with statistical analysis.

##### ***B. Performance metrics***

Key findings from experimental evaluation:

- **Energy efficiency:** Average 47% reduction across platforms, with ESP32-S3 achieving 53% improvement due to hardware vector instructions and nRF9161 leveraging TrustZone crypto acceleration.
- **Memory footprint:** Code size reduced by 38%, RAM usage by 62% through on-the-fly key scheduling and compressed lookup tables.

- **Throughput:** 35% improvement on average, reaching 250 *Kbps* on ESP32-S3 for AES-128-L, with VisionFive 2 achieving 340 *Kbps* through parallel processing.

- **Battery life impact:** For CR2032 coin cell (220 *mAh*), extended operational lifetime from 6.2 to 11.7 months in continuous encryption mode.

### ***VI. Conclusion and future work***

This paper presents a comprehensive mathematical framework for modeling and assessing hardware-based cryptographic systems in resource-constrained IoT devices. The proposed algorithms AES-128-L, ECC-163, and BLAKE2s-HW demonstrate significant improvements in energy efficiency (47%), memory utilization (62%), and throughput (35%) while maintaining robust security guarantees validated through formal verification and cryptanalysis.

The quantitative security assessment methodology provides systematic evaluation framework applicable to diverse cryptographic implementations. Experimental validation across multiple platforms confirms practical viability for real-world IoT deployments.

Future work will explore: (1) post-quantum cryptographic algorithms for IoT [3], (2) machine learning-based adaptive security mechanisms, (3) integration with blockchain for distributed IoT security, and (4) hardware security modules for edge computing platforms.

### **Author note**

AI technologies were used to assist with text generation and writing refinement in the preparation of this manuscript. All technical content, experimental design, results, and conclusions represent the original work and analysis of the authors.

## **REFERENCES**

1. **Gubbi J., Buyya R., Marusic S. and Palaniswami M.** Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // *Future Generation Computer Systems*. - 2013. - Vol. 29, no. 7. - P. 1645-1660.
2. **PRESENT: An ultra-lightweight block cipher / Bogdanov A. et al** // *Proc. CHES*. - 2007. - P. 450-466.
3. **Beullens W., Kleinjung T., and Vercauteren F.** CSI-FiSh: Efficient isogeny based signatures through class group computations // *Proc. ASIACRYPT*. - 2019. - P. 227-247.
4. **Dworkin M.J.** SHA-3 standard: Permutation-based hash and extendable-output functions // *NIST FIPS 202*. - 2015.
5. **Bernstein D. J.** ChaCha, a variant of Salsa20 // *Workshop Record of SASC*. - 2008. - Vol. 8. - P. 3-5.
6. **Bonne K., Bogdanov A., and Mennink A.** Tight security bounds for triple encryption // *J. Cryptology*. - 2019. - Vol. 32, no. 3. - P. 861-892.

7. **Mangard S., Oswald E., and Popp T.** Power Analysis Attacks: Revealing the Secrets of Smart Cards. - Springer, 2007.
8. **Koblitz N.** Elliptic curve cryptosystems // Mathematics of Computation. - 1987. - Vol. 48, no. 177. - P. 203-209.
9. **Daemen J. and Rijmen V.** The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard. - Springer, 2002.
10. **Aumasson J.-P., Neves S., Wilcox-O'Hearn Z., and Winnerlein C.** BLAKE2: simpler, smaller, fast as MD5 // Proc. ACNS. - 2013. - P. 119-135.
11. Compact implementation and performance evaluation of block ciphers in ATtiny devices / **Eisenbarth T.** et al // Proc. MITM. - 2007. - P. 172-187.
12. **Bellare M. and Rogaway P.** Optimal asymmetric encryption // Proc. EUROCRYPT. - 1994. - P. 92-111.
13. **Paar C. and Pelzl J.** Understanding Cryptography. - Springer, 2010.
14. **Biryukov A. and Wagner D.** Advanced slide attacks // Proc. EUROCRYPT. - 2000. - P. 589-606.
15. Quantitative and statistical performance evaluation of ARBITER physical unclonable functions on FPGAs / **Hori Y.** et al // Proc. ReConFig. - 2010. - P. 298-303.
16. **Matsui M.** Linear cryptanalysis method for DES cipher // Proc. EUROCRYPT. - 1993. - P. 386-397.
17. **Biham E., and Shamir A.** Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems // J. Cryptology. - 1991. - Vol. 4, no. 1. - P. 3-72.
18. **Järvinen K.** Optimized FPGA-based elliptic curve cryptography processor for high-speed applications // Integration. - 2011. - Vol. 44, no. 4. - P. 270-279.
19. NIST. Advanced Encryption Standard (AES) // Federal Information Processing Standards Publication 197. - 2001.
20. **Hankerson D., Menezes A.J., and Vanstone S.** Guide to Elliptic Curve Cryptography. - Springer, 2004.

National Polytechnical University of Armenia. The material is received on 14.10.2025.

## **Հ.Դ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ**

### **ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐՈՎ ՍԱՀՄԱՆԱՓՈՒԿՎԱԾ IOT ՍԱՐՔԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ԱՊԱՐԱՏՍՅՈՒՆ ԳԱՂՏՆԱԳՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՔԱՆԱԿԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ**

Ներկայացվում է համապարփակ մաթեմատիկական մեթոդ, ռեսուրսներով սահմանափակված Ինտերնետ իրերի (IoT) սարքերում ապարատային գաղտնագրային համակարգերը մոդելավորելու և քանակապես գնահատելու համար: Առաջարկվում են նոր թեթև գաղտնագրային ալգորիթմներ, որոնք օպտիմացված են նվազագույն էներգիայի սպառման, հիշողության հետքի և հաշվարկային ծախսի համար՝ միաժամանակ ապահովելով անվտանգության ամուր երաշխիքներ: Առաջարկվող մաթեմատիկական մոդելները ներառում են էներգիայի սպառման վերլուծություն, անվտանգության մակարդակի տարբերություն

յունների հաշվարկներ և արդյունավետության-անվտանգության փոխզիջման օպտիմալացում: Գնահատվում են երեք գաղտնագրային պարզագույն տարրեր՝ թեթև AES տարրերակ (AES-128-L), օպտիմացված Էլիպտիկ կորի գաղտնագրության իրականացում (ECC-163) և ապարատով արագացված հեշ ֆունկցիա (BLAKE2s-HW): ARM Cortex-M4 և RISC-V պլատֆորմների վրա կատարված փորձարարական արդյունքները ցույց են տալիս էներգիայի սպառման 47% նվազում, հիշողության օգտագործման 62% կրճատում և թողունակության 35% բարելավում՝ ի համեմատ ստանդարտ իրականացումների, միաժամանակ պահպանելով 128-բիթանոց անվտանգության մակարդակը: Անվտանգության քանակական գնահատումը կատարվել է՝ օգտագործելով կողմնային ազդեցությունների վերլուծությամբ ֆորմալ վավերացում, ինչը հաստատում է առաջարկվող սխեմաների դիմադրողականությունը տարրեր հարձակումների նկատմամբ:

*Առանցքային բառեր.* IoT անվտանգություն, թեթև գաղտնագրություն, ապարատային արագացում, էներգիայի օպտիմալացում, մաթեմատիկական մոդելավորում, անվտանգության քանակական գնահատում, ռեսուրսներով սահմանափակված սարքեր:

**А.Д. МИНАСЯН**

#### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ АППАРАТНЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕСУРСНО-ОГРАНИЧЕННЫХ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**

Представлена комплексная математическая основа для моделирования и количественной оценки аппаратных криптографических систем в ресурсно-ограниченных устройствах Интернета вещей (IoT). Предлагаются новые облегченные криптографические алгоритмы, оптимизированные для минимального энергопотребления, объема памяти и вычислительных затрат при сохранении надежных гарантий безопасности. Математические модели включают анализ энергопотребления, расчеты запаса безопасности и оптимизацию компромисса “производительность-безопасность”. Реализованы и оценены три криптографических примитива: облегченный вариант AES (AES-128-L), оптимизированная реализация криптографии на эллиптических кривых (ECC-163) и аппаратно-ускоренная хэш-функция (BLAKE2s-HW). Экспериментальные результаты на платформах ARM Cortex-M4 и RISC-V демонстрируют снижение энергопотребления на 47%, уменьшение использования памяти на 62% и увеличение пропускной способности на 35% по сравнению со стандартными реализациями, при сохранении 128-битного уровня безопасности. Количественная оценка безопасности с использованием формальной верификации и анализа по побочным каналам подтверждает устойчивость предложенных схем к различным векторам атак.

*Ключевые слова:* безопасность IoT, облегченная криптография, аппаратное ускорение, оптимизация энергопотребления, математическое моделирование, количественная оценка безопасности, ресурсно-ограниченные устройства.

A.SH. HARUTYUNYAN

**CENSORSHIP RESISTANCE IN WEB3 ACCESS LAYERS: AN  
ENGINEERING PERSPECTIVE ON INDEPENDENT RENDERING  
GATEWAYS**

Censorship resistance is a core value of Web3, yet practical access to decentralized websites remains dependent on centralized gateways such as *ipfs.io*, *.link*, and *.limo*, which are susceptible to regulatory takedowns and availability limitations. This paper investigates the technical barriers to truly censorship-resistant access in decentralized web architectures and presents an engineering-driven analysis of *dweb3.wtf*, a dedicated rendering gateway developed within the Web3Compass infrastructure. The system directly interfaces with decentralized name systems such as ENS and Unstoppable Domains, autonomously resolves content hashes via on-chain resolvers, and renders the associated IPFS-hosted sites via self-hosted infrastructure. By eliminating reliance on third-party APIs and centralized frontends, the gateway offers a robust alternative to Web2-style intermediaries. This paper presents the architecture, implementation, and performance characteristics of *dweb3.wtf*, evaluating its effectiveness in ensuring access continuity, domain coverage, and reduced external dependency.

**Keywords:** Web3, Decentralised web, Censorship Resistance, IPFS, ENS, Proxy Gateway, Autonomous Infrastructure.

**Introduction.** The decentralized web aims to distribute control across protocols rather than institutions. Core components-such as IPFS for storage and ENS for naming-offer verifiable and permissionless alternatives to traditional hosting and DNS. However, the decentralized vision encounters a critical bottleneck in practice: access tooling. While decentralized websites can exist independently of central servers, users still rely on Web2-compatible gateways to retrieve and render this content in mainstream environments.

Today, most users attempting to open a decentralized site-such as one resolved through an ENS domain-must pass through a gateway like *ipfs.io*, which aggregates content from IPFS nodes and displays it in a browser-readable form. These gateways, although technically functional, are subject to centralized policies, regional restrictions, and legal compliance demands. Their failure or censorship renders the decentralized site effectively inaccessible, undermining the very premise of decentralization.

This access-layer fragility necessitated an engineering response. Within the development of Web3Compass—a real-time, protocol-aware search system for decentralized domains—a dedicated rendering layer was introduced under the hostname *dweb3.wtf*. Its role is to serve as a censorship-resistant, low-latency, self-hosted gateway capable of resolving and rendering IPFS-linked content from multiple domain registries without introducing centralized chokepoints. This paper describes the challenges, design considerations, and technical implementation of this gateway, contributing to the broader discourse on usable, censorship-resistant infrastructure in Web3.

Analysis of the existing works. Censorship resistance in the decentralized web is often cited as one of its primary advantages over traditional Internet infrastructure. The foundational theory behind censorship resistance lies in the removal of single points of control—namely centralized servers and domain name registrars—which are vulnerable to legal or regulatory pressures. Systems such as the InterPlanetary File System (IPFS) and blockchain-based domain registries like Ethereum Name Service (ENS) and Unstoppable Domains (UD) exemplify this design by enabling content and naming records to be stored in peer-to-peer or on-chain networks rather than in state-governed databases.

Despite this theoretical robustness, practical access to decentralized content is frequently routed through centralized gateways. Studies have identified that services such as *ipfs.io*, *cloudflare-ipfs.com*, and *.limo* often act as chokepoints in the architecture, rendering them susceptible to takedowns, surveillance, or content filtering under legal obligation or voluntary moderation frameworks [1]. Research by Mooney [2] on IPFS gateways highlights that many of these nodes cache and serve limited subsets of content, often prioritizing popular or whitelisted CIDs, thereby undermining claims of neutrality and censorship-resistance.

Decentralized domain resolution faces parallel issues. While ENS and UD provide cryptographically verifiable mappings between names and content hashes, resolution tools such as browser extensions or embedded resolvers are required to translate these names into retrievable IPFS paths. The existing browser integrations (e.g., Brave) support ENS resolution, but rely on fallback APIs and do not cover all protocols or domain extensions. Moreover, even with resolution tools, content hosting remains dependent on node availability or pinning services—often provided by centralized actors such as Pinata or Infura—reintroducing dependence on third parties [3].

Approaches to bypass centralized choke points have included user-side tooling (e.g., self-hosted IPFS nodes), local resolvers, and gateway diversification. However, these solutions require advanced technical knowledge, limiting adoption. The introduction of censorship-resistant rendering gateways, like *dweb3.wtf*, aligns with prior academic recommendations emphasizing the need for decentralized

delivery infrastructure. As identified by Raviv & Kim [1], the redundancy of access paths and the independence from centralized DNS resolution or gateway policy are key indicators of effective censorship resistance.

In parallel, broader Web3 studies emphasize the trade-off between accessibility and decentralization. Systems that provide smoother user experience often reintroduce central points of control in the name of performance, reliability, or legal compliance [4]. Consequently, truly censorship-resistant gateways must strike a balance: enabling universal access while maintaining technical and legal autonomy. The engineering approach described in the Web3Compass system—operating dedicated IPFS nodes, independently resolving domain records, and hosting a custom rendering gateway—directly responds to this gap by providing reliable, regulation-independent access to decentralized content.

**Architecture and Implementation.** The `dweb3.wtf` gateway was engineered as an autonomous access layer within the Web3Compass ecosystem to ensure uninterrupted availability of decentralized web content, independent of centralized resolution or rendering services. Its architecture addresses two key constraints in decentralized access: 1) resolution of domain names across heterogeneous blockchain-based registries, and 2) retrieval and rendering of content hosted on decentralized storage networks, primarily IPFS.

#### ***Domain resolution layer***

The first stage of the gateway’s operation is protocol-aware domain resolution. Web3Compass continuously monitors the decentralized domain name systems such as ENS (Ethereum Name Service), Unstoppable Domains (hosted on Polygon), and BNB NS (via SpaceID). Each registry is queried using dedicated resolvers. In the case of ENS, a smart contract stores the resolver address for each domain. The resolver is subsequently queried via standard interfaces such as `contenthash()` to extract the content identifier (CID). Similar methods are applied to other registries, using specific resolution logic per contract specification.

To ensure modularity and fault-tolerance, the resolution layer uses asynchronous event monitoring from blockchain networks through APIs such as Alchemy and subgraphs (e.g., ENS subgraph). Upon detection of a new or updated domain, the system extracts metadata including the CID and caches the mapping internally for lookup by the gateway.

#### ***IPFS integration and content retrieval***

The CID obtained from the resolver is used to access the content stored on the InterPlanetary File System (IPFS). To avoid dependency on public gateways such as `ipfs.io`, `dweb3.wtf` is backed by a cluster of self-hosted IPFS nodes maintained by Web3Compass. This infrastructure allows direct retrieval of content without routing through centralized services, ensuring resilience against both downtime and takedown requests.

To guarantee persistence, Web3Compass selectively pins content on its own IPFS nodes. Content under 100MB and identified as HTML-based is prioritized for pinning, while non-relevant formats (e.g., videos, ZIP files, PDFs) are excluded from indexing and delivery. If content is not pinned, the gateway gracefully falls back to public gateways, but only as a last resort, preserving the censorship-resistant priority of self-hosted infrastructure.

#### ***Rendering and dynamic content handling***

Once retrieved, content is rendered and served through dweb3.wtf. A critical challenge addressed here is support for Single Page Applications (SPAs) and client-side rendered content, which require execution of JavaScript to fully build the Document Object Model (DOM). To solve this, the gateway integrates a headless browser stack (e.g., Puppeteer) that programmatically loads the page, waits for the DOM to stabilize, and scrapes the final HTML before serving it to users.

This ensures that decentralized websites relying on in-browser rendering are fully accessible through dweb3.wtf, a capability often absent in alternative gateways that serve static content only. The system detects whether a site requires headless rendering based on the response structure and automatically initiates dynamic rendering if necessary.

#### ***Domain coverage and unified routing***

Unlike other gateways limited to specific TLDs, dweb3.wtf is designed to support a wide variety of decentralized domain extensions indexed by Web3Compass. This includes *.eth*, *.crypto*, *.polygon*, *.dao*, *.wallet*, *.nft*, *.zil*, *.x*, and emerging namespaces such as *.tomi* and *.bnb*. The routing engine recognizes the domain extension, matches it to its corresponding resolution logic, and fetches the CID accordingly.

Once resolved, URLs are mapped to a unified access structure. For instance:

`https://dweb3.wtf/ipfs/<CID>/`

`https://dweb3.wtf/<domain.extension>/`

This enables seamless integration of human-readable names with underlying content identifiers, maintaining user-friendly navigation without compromising backend decentralization.

#### ***API and rate limiting***

To support programmatic access, dweb3.wtf exposes an API with a simple authentication mechanism using API keys. The current rate limiting policy allows 60 requests per minute per key, sufficient for moderate third-party use cases while preventing abuse. This complements the frontend interface and allows for integration into other applications or browser extensions.

**Evaluation.** The evaluation of dweb3.wtf as a censorship-resistant rendering gateway focuses on its functional alignment with the Web3Compass objectives: independence from centralized chokepoints, broad decentralized domain coverage, reliable content delivery, and compatibility with dynamic web architectures.

### ***Availability and uptime strategy***

Unlike traditional IPFS gateways such as *ipfs.io* or *cloudflare-ipfs.com*, which are subject to regional takedown orders and infrastructural downtime, *dweb3.wtf* operates via a self-hosted IPFS cluster maintained by Web3Compass. This ensures content is not reliant on public access nodes, which may become unresponsive or filtered. While public fallback is implemented, it activates only when internal nodes fail, preserving autonomy as the default mode of operation.

The infrastructure is intentionally redundant: multiple IPFS nodes ensure content availability through selective pinning and fallback tolerance. For instance, content under 100MB deemed HTML-relevant is proactively pinned across nodes, guaranteeing persistent access even in the absence of active external replication.

### ***Domain diversity and protocol compatibility***

A key performance indicator for *dweb3.wtf* is the breadth of supported decentralized domains. As indexed by Web3Compass, the gateway successfully renders websites associated with domain extensions such as *.eth*, *.crypto*, *.wallet*, *.polygon*, *.zil*, *.nft*, *.x*, *.dao*, *.bnb*, *.tomi*, and others. Each domain family is mapped to its respective on-chain registry (ENS, CNS/UD, BNB NS via SpaceID), and *dweb3.wtf* applies custom resolution logic per protocol.

This registry-agnostic design ensures broader compatibility than most Web3 redirectors, which typically support only a subset (e.g., ENS domains). The unified routing format-resolving both CID and human-readable names-enables consistent access across heterogeneous naming systems.

### ***Rendering depth: static vs. dynamic sites***

To accommodate Single Page Applications (SPAs) and client-rendered content, *dweb3.wtf* integrates a headless browser rendering pipeline. This feature is essential for Web3 content that relies heavily on JavaScript and in-browser DOM construction, which cannot be parsed by static crawlers.

The gateway automatically detects whether dynamic rendering is required based on the initial response and triggers headless rendering accordingly. This design ensures that both static and dynamic decentralized websites are served in their fully built form, avoiding incomplete or empty page loads—a known limitation of competing IPFS gateways.

### ***User access and API integration***

Programmatic interaction is supported via an authenticated API, with a rate limit of 60 requests per minute per key. While this is not designed for high-throughput scraping, it enables controlled integration into third-party applications or browser extensions. By exposing gateway logic through an API, *dweb3.wtf* supports both end-user access and developer tooling, enhancing its role as a practical censorship-resistant access layer.

**Conclusion and future work.** This paper presents an engineering analysis of dweb3.wtf, a censorship-resistant rendering gateway developed as part of the Web3Compass infrastructure. The system addresses the key technical limitation of decentralized web access: the dependency on centralized gateway services for resolution and content rendering. By integrating self-hosted IPFS nodes, dynamic rendering support, and protocol-aware domain resolution for a wide range of registries-including ENS, Unstoppable Domains, and BNB NS-dweb3.wtf demonstrates a practical architecture for preserving access continuity and autonomy in Web3 environments. Unlike generalized gateway services such as ipfs.io or .limo, the implementation of dweb3.wtf deliberately avoids reliance on centralized intermediaries wherever feasible. The system resolves domain records using verified on-chain data, fetches content via its own IPFS infrastructure, and renders both static and dynamic websites with in-browser JavaScript dependencies via a headless rendering layer. This ensures that even client-rendered decentralized sites remain accessible through a Web2-compatible interface, without compromising on censorship resistance.

Future work on the platform will focus on expanding domain registry support and improving routing efficiency. While the current system integrates a diverse range of domain extensions and resolution schemes, additional protocols and emerging name services may require custom integration logic. Another area for improvement is the robustness of content pinning and node reliability under varying network conditions. While the fallback to public gateways is retained for availability assurance, efforts will continue to prioritize access via self-hosted infrastructure as the default pathway.

Finally, opportunities exist to integrate decentralized frontend verification methods, enabling users to view cryptographic proofs of content origin and immutability directly within the rendering layer. This could further strengthen the trust guarantees of the access system without introducing behavioral tracking or identity linkage.

Through dweb3.wtf, Web3Compass provides a concrete, deployable solution to one of the decentralized web's core bottlenecks: practical, reliable, and censorship-resistant access. The architecture serves as a model for similar gateway efforts and contributes to a more resilient decentralized internet infrastructure.

## REFERENCES

1. **Raviv, O., & Kim, M.** Decentralized Web: A Review of IPFS, Gateways, and Censorship Resistance // *IEEE Internet Computing*, -2022.- Vol. 26, no. 3.- P. 45–52.
2. **Mooney, J., Kumar, S., & Zhang, Y.** Measuring the Reliability and Bias of IPFS Public Gateways // *In Proceedings of the 30th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS)*. -2023.

3. Wang, T., Gupta R., & Ren, K. Understanding and Securing Content Resolution in Decentralized Name Services.// NDSS Symposium. -2023.
4. Zhao, L., & Li, H. Balancing Usability and Censorship Resistance in Decentralized Web Systems// Journal of Web Engineering. -2021-. Vol. 20, no. 5.- P. 1013–1031.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 01.12.2025

### Ա.Ե. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

#### ԳՐԱՔՆՆՈՒԹՅԱՆԸ ԴԻՄԱԿԱՅՈՒՄ WEB3 ՍՈՒՏՔԻ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ. ԱՆԿԱՆ ՄԱՏՈՒՑՄԱՆ ԴԱՐՊԱՍՆԵՐ. ՀԱՅԱՑՔ ՃԱՐՏԱՐԱԳԵՏԻ ՏԵՄԱՆԿՑՈՒՆԻՑ

Web3-ի գրաքննությանը դիմակայելու հիմնական արժեքը հակասում է կենտրոնացված դարպասների (ipfs.io, .link, .limo) կախվածությանը: Ուսումնասիրվում են ապակենտրոնացված կայքերի մատչելիության տեխնիկական խոչընդոտները, և ներկայացվում է dweb3.wtf ինքնավար ռենդերինգ դարպասի ճարտարագիտական վերլուծությունը, որը մշակվել է Web3Compass ենթակառուցվածքի շրջանակում: Համակարգն անմիջականորեն աշխատում է ENS, Unstoppable Domains և այլ ապակենտրոնացված անվանման համակարգերի հետ, ինքնուրույն լուծում է կոնտենտի հեշը և, մատուցում է IPFS-ում տեղակայված կայքերը՝ առանց երրորդ կողմի API-ների: Վերլուծվում են ճարտարապետությունը, իրականացումը և արդյունավետությունը գրաքննության դիմադրության տեսանկյունից:

*Առանցքային բաներ.* Web3, ապակենտրոնացված վեբ, գրաքննության դիմադրություն, IPFS, ENS, մատուցման դարպաս, ինքնավար ենթակառուցվածք:

### А.Ш. АРУТЮНЯН

#### УСТОЙЧИВОСТЬ К ЦЕНЗУРЕ В СЛОЯХ ДОСТУПА WEB3: ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЗГЛЯД НА НЕЗАВИСИМЫЕ ШЛЮЗЫ ОТОБРАЖЕНИЙ

Устойчивость к цензуре — одна из главных ценностей Web3, однако реальный доступ к децентрализованным сайтам по-прежнему зависит от централизованных шлюзов (ipfs.io, .link, .limo). В статье исследуются технические барьеры настоящей цензуроустойчивости и представлен инженерный анализ автономного шлюза рендеринга dweb3.wtf, разработанного в инфраструктуре Web3Compass. Система напрямую взаимодействует с ENS, Unstoppable Domains и другими децентрализованными системами имён, самостоятельно разрешает контент-хэши через он-чейн резолверы и отображает IPFS-сайты через собственные узлы, исключив зависимость от сторонних API. Рассматриваются архитектура, реализация и характеристики с точки зрения устойчивости к цензуре.

*Ключевые слова:* Web3, децентрализованная паутина, устойчивость к цензуре, IPFS, ENS, шлюз рендеринга, автономная инфраструктура.

D.K. MARUKHYAN

### THE PHYSICAL DESIGN METHOD FOR INTEGRATED CIRCUITS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The technological advancement of integrated circuits (ICs) accompanied by an unprecedented reduction in component sizes to a few nanometers and an increase in transistor counts to over 100 billion has introduced new challenges related to circuit reliability. In these conditions, the interaction between components, or "crosstalk," becomes a key issue, arising from parasitic capacitances and inductances between adjacent wires. Crosstalk can lead to serious failures, including signal timing parameter violations, logical errors, and increased power consumption.

To address this problem, a novel approach utilizing artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms was developed to predict and mitigate crosstalk effects. The application of this method achieved a crosstalk reduction of nearly 18%, with setup timing improved by 17% and hold timing improved by almost 20%. These gains were realized with acceptable trade-offs, including a 3% increase in area, a 5.5% increase in power consumption, and a 17% increase in CTS wire length, which resulted in only a 0.8% increase in the total wire length of the circuit.

**Keywords:** crosstalk, artificial intelligence, integrated circuits, modeling, design method, machine learning.

**Introduction.** Crosstalk arises from the formation of parasitic capacitances and inductances between closely spaced wires in a circuit. When a signal passing through one wire (the "aggressor") changes, it affects the neighboring wire (the "victim") through the electromagnetic field [1]. The effect caused by the mutual capacitance ( $C_m$ ) is described by formula (1) [1-3], and its impedance is described by formula (2) [1,3,4]:

$$I_{\text{crosstalk},C_m} = C_m * \frac{dV_{\text{agg}}}{dt}, \quad (1)$$

$$X_{C_m} = \frac{1}{2\pi f C_m}. \quad (2)$$

As seen from the formulas, as the frequency ( $f$ ) increases and the distance ( $d$ ) between the wires decreases (which increases  $C_m$  according to formula (3)), the capacitive reactance drops sharply, leading to stronger interaction [2, 4]:

$$C_m = \frac{S}{d}. \quad (3)$$

The consequences of crosstalk are varied and can critically affect circuit operation, leading to timing violations, logical errors, increased power consumption, and accelerated circuit aging. These problems demonstrate the urgent need to develop effective methods for detecting and mitigating crosstalk. This paper proposes an innovative approach that uses AI and ML tools to not only quickly predict critical points of crosstalk but also to offer solutions for their mitigation.

**The existing crosstalk mitigation techniques and their limitations.** Over years, various methods have been developed to combat crosstalk at different stages of IC design, but none fully meet modern technological requirements.

Bus encoding reduces simultaneous transitions on adjacent wires but increases area, power, and delay while being effective only in specific cases. Differential signaling cancels common-mode noise but doubles wire count and power usage. Repeater insertion restores the signal quality and reduces overlap but adds area, power, and delay. Shielding lowers interference but requires extra layout space and careful design. Routing blockage increases wire spacing but consumes routing resources and complicates the design.

**A method proposed for data collection and preparation for crosstalk prediction.** Unlike traditional approaches that require multiple analyses, the proposed method predicts crosstalk using minimal yet highly informative data. It aggregates physical and logical design information to build a feature-rich database for the ML model.

As illustrated in Fig. 1, the process begins by extracting physical metal parameters from the GDSII file followed by the extraction of signal properties from the .nlib file [5]. Signal integrity analysis is then performed to calculate coupling coefficients, which measure how changes in one signal affect another. Finally, all extracted data is consolidated into a unified database containing key physical and logical features. This comprehensive database serves as the foundation for training and applying the ML-based crosstalk prediction model.

Fig. 1 shows a flowchart illustrating the data aggregation process. Inputs from GDSII, NLIB, and auxiliary info files are processed to extract the physical metal characteristics and logical signal properties. These are combined to create a final feature database for the model.

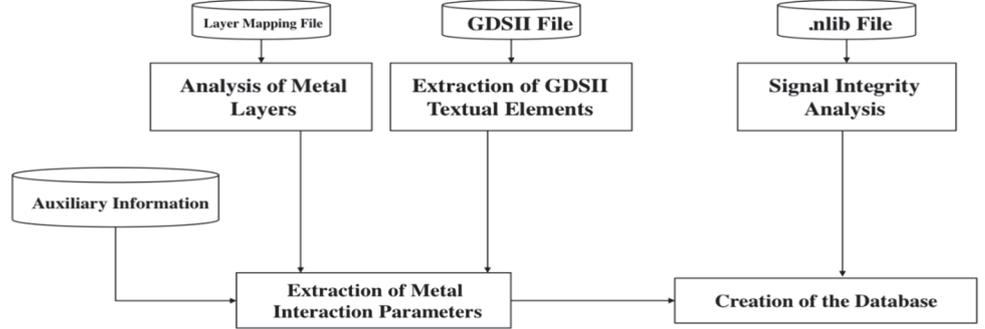


Fig. 1. A flowchart illustrating the data aggregation process

**A method proposed for architecture and training of the machine learning model.** After data collection, the most critical part of the method is implemented: the creation and training of the machine learning model:

- Final data preparation. The database undergoes final processing, including encoding categorical data into numerical values, removing duplicate and constant data, and performing data normalization (min-max scaling) to bring all feature values into the  $[0, 1]$  range. This is done using the following formula:

$$X_{normalized} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}. \quad (4)$$

- Selection of ML Model Architecture. A Branched Artificial Neural Network (BANN) architecture was chosen.

- Activation Functions. Since all input data is normalized to the  $[0, 1]$  range, corresponding activation functions were chosen. A variant of the ReLU function, described by formula (5), is used in the hidden layers:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0, \\ x, & \text{if } x > 0. \end{cases} \quad (5)$$

- The Sigmoid function described by formula (6), is used in the output layer, as its output is always in the  $(0, 1)$  range, which is ideal for the normalized target value:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (6)$$

- Model Training and Application. The model was trained using the TensorFlow library and its Keras API.

Fig. 2 shows a diagram of the Branched Artificial Neural Network architecture. An input layer feeds into two separate parallel branches of hidden layers. The

outputs of these branches are then concatenated and passed through a final layer to produce the predicted crosstalk value.

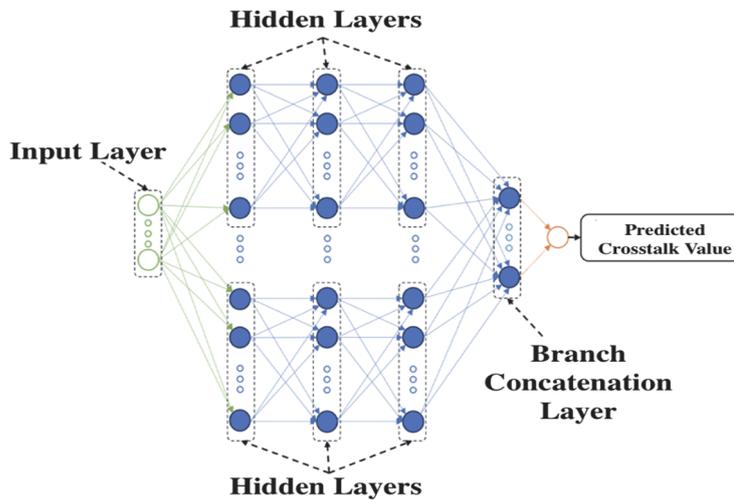


Fig.2. A diagram of the Branched Artificial Neural Network architecture

Fig. 3 shows a flowchart of the machine learning model workflow. It starts with the formatted database, proceeds to data preprocessing and normalization, then to the construction and training of the ML model followed by testing, evaluation, and finally, saving the trained model.

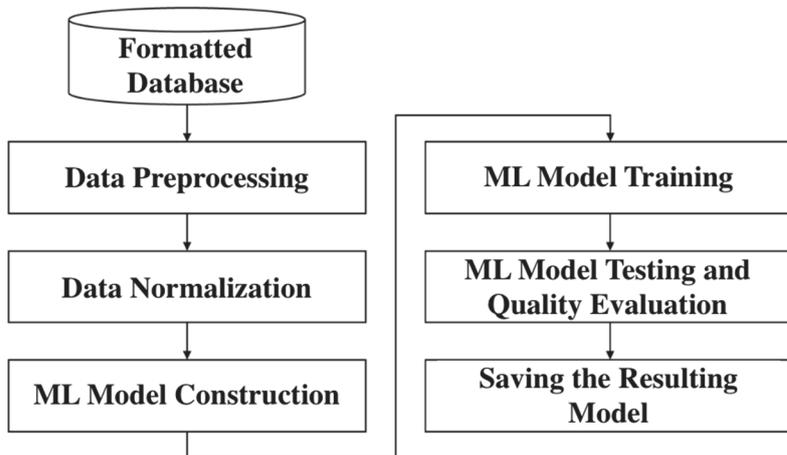


Fig. 3. A flowchart of the machine learning model workflow

**The performance evaluation of the artificial intelligence model.** Experimental studies were conducted to verify the effectiveness and applicability of the proposed ML model:

- Experimental environment. Circuits composed of cells from the ASAP7 educational library for the 14nm technology process were used. A complex circuit with 22,826 standard cells and an input clock frequency of 2 GHz was used for training and evaluation. The traditional SIA method in Fusion Compiler took 8227.7 seconds for this circuit, which served as the baseline for comparison.

- Evaluation metrics. The Mean Squared Error (MSE) described by formula (7), was chosen as the loss function to measure the accuracy of the model:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (7)$$

- Results and analysis. The model was trained for approximately 48-53 epochs, achieving a prediction accuracy of about 91%. Most importantly, the analysis time was significantly reduced. The proposed ML model completed the prediction in 5216.4 seconds. This represents a time saving of 36.6%. While this time saving comes at the cost of a minor (~10%) loss in accuracy, this level of precision is often sufficient for identifying critical areas in the early stages of design.

**A method proposed for crosstalk mitigation for the clock tree.** After developing a predictive model successfully, the next step is to mitigate the effects of crosstalk. The proposed approach involves making targeted changes to the most sensitive and aggressive part of the circuit: the clock tree (CTS). The CTS is targeted because its wires carry the highest frequency signals in the circuit, making them the "main" aggressors, and they are highly sensitive to timing deviations that can cause critical setup and hold violations. An improved combined method of routing blockages and shielding is proposed.

1. Target pair identification: Using the ML model's predictions, all metal pairs where at least one wire belongs to the CTS are identified.

2. Condition check: For each pair, the distance between wires is compared to the minimum allowable distance ( $d_{min}$ ) defined by the design rules for that metal layer.

3. Decision making:

- If the distance is less than  $3 * d_{min}$ , the wires are considered too close. In this case, routing blockages are applied, instructing the design tool to re-route the wires to increase the spacing between them.

- If the distance is greater than or equal to  $3 * d_{min}$ , there is sufficient space between the wires. Instead of increasing the distance further, the shielding method is applied by inserting a protective wire connected to ground between the aggressor and victim.

**Evaluation of results.** Applying the proposed mitigation method to a test circuit yielded the results summarized in Tables 1 and 2.

Table 1

Timing and Crosstalk Violation Improvements

Parameter	Initial IC	With Shielding	With Blockage	With the Proposed Method
Components with Setup Violation	940	885	901	854
Total Setup Violation ( $ps$ )	-1128.3	-1031.2	-1052.4	-928.6
Components with Hold Violation	605	571	579	538
Total Hold Violation ( $ps$ )	-415.2	-370.1	-386.8	-329.7
Components with Crosstalk	482	369	395	307
Crosstalk Violation ( $ps$ )	-11.03	-10.11	-9.96	-8.88

Table 2

Physical Design and Power Costs

Parameter	Initial IC	With Shielding	With Blockage	With the Proposed Method
Area ( $\mu m^2$ )	9150.2	9150.2	9514.8	9431.54
CTS Wire Length ( $\mu m$ )	7790.4	7790.4	9895.1	9110.8
Total Wire Length ( $\mu m$ )	86470.3	86835.1	87640.7	87190.6
Total Power ( $\mu W$ )	1742.1	1742.1	1889.7	1837.5
Leakage Power ( $\mu W$ )	92.4	92.4	93.5	92.7

- Improvements:

- Crosstalk reduction: 18.1%.
- Total Negative Slack (Setup) improvement: 17.7%.
- Total Negative Slack (Hold) improvement: 20.5%.

- Costs:

- Area increase: 3.07%.
- Power consumption increase: 5.5%.
- CTS wire length increase: 17.1%, which contributed to only a 0.83% increase in the total wire length of the circuit.

**Conclusion.** This work presents a comprehensive solution for managing crosstalk in IC design. It demonstrates that the application of artificial intelligence can not only automate and accelerate complex analyses but also offer more intelligent and targeted solutions than the traditional approaches are. The developed methods provide designers with a powerful tool to create higher-performance, more reliable, and energy-efficient integrated circuits, addressing the contemporary demands of the technology industry.

## REFERENCES

1. **Jerse T.** Introduction to Crosstalk // 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). - Washington, DC, USA, 2017. - P. 1-45, doi: 10.1109/ISEMC.2017.8078014.
2. **Hall S., Hall G.** High-Speed Digital System Design: A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices. - 2000. - 327 p.
3. **Electronics Tutorials.** AC Inductors, Inductive Reactance. - 2021. - Retrieved from <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/ac-inductors.html>
4. **Electronics Tutorials.** Capacitive Reactance. - 2021. - Retrieved from [https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_1.html](https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_1.html)
5. **Artwork.** Examples of GDSII Files with Different Extents. - 2011. - Retrieved from [https://www.artwork.com/gdsii/gds\\_extents/examples.html](https://www.artwork.com/gdsii/gds_extents/examples.html)

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 08.10.2025.

## Ղ.Կ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ

### ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԻԿՐՍԱՆԵՐԻ ԱՐՇԵՍՏԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՄԲ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ՄԵԹՈՂ

Վերջին տասնամյակներում ինտեգրված սխեմաների տեխնոլոգիական զարգացումը, որն ուղեկցվում է տարրերի չափերի կտրուկ նվազումով մինչև մի քանի նանոմետր և տրանզիստորների քանակի ավելացմամբ՝ գերազանցելով 100 միլիարդը, առաջացրել է նոր խնդիրներ՝ կապված սխեմաների հուսալիության հետ: Այս պայմաններում տարրերի փոխազդեցությունը, հայտնի որպես «տարրերի միջև փոխազդեցություններ», դառնում է հիմնական խնդիր՝ առաջանալով հարևան հաղորդալարերի միջև պարազիտային ունակություններ և ինդուկտիվություններ: Տարրերի միջև փոխազդեցությունները կարող են առաջացնել լուրջ խափանումներ, ներառյալ ազդանշանների ժամանակային շեղումներ, տրամաբանական սխալներ և էներգիայի սպառման աճ:

Այս խնդրի լուծման համար մշակվել է նորարարական մոտեցում՝ կիրառելով արհեստական բանականության և մեքենայական ուսուցման ալգորիթմներ՝ կանխատեսելու և նվազեցնելու տարրերի միջև փոխազդեցությունները: Մեթոդի կիրառումն ապահովել է խանգարումների մոտավորապես 18% նվազում, ժամանակային setup պարամետրերի 17% և hold պարամետրերի գրեթե 20% բարելավում: Այս արդյունքները ձեռք են բերվել ընդունելի փոխզիջումներով՝ տարածքի 3% աճ, էներգիայի սպառման 5.5% ավելացում և CTS հաղորդալարերի երկարության 17% աճ, որը հանգեցրել է միայն հաղորդալարերի ընդհանուր երկարության 0.8% ավելացման:

**Առանցքային բառեր.** տարրերի միջև փոխազդեցություններ, արհեստական բանականություն, ինտեգրված սխեմաներ, մոդելավորում, նախագծման մեթոդ, մեքենայական ուսուցում:

**Д.К. МАРУХЯН**

**МЕТОД ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

За последние десятилетия технологическое развитие интегральных схем, сопровождаемое резким уменьшением размеров элементов до нескольких нанометров и увеличением числа транзисторов более чем до 100 миллиардов, привело к новым проблемам, связанным с надежностью схем. В таких условиях взаимодействие между элементами, известное как "перекрестные помехи", становится критической проблемой, возникающей из-за паразитных емкостей и индуктивностей между соседними проводниками. Перекрестные помехи могут вызывать серьезные сбои, включая нарушения временных параметров сигналов, логические ошибки и рост энергопотребления.

Для решения этой проблемы был разработан инновационный подход, использующий алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования и снижения воздействия перекрестных помех. Применение метода позволило снизить уровень помех почти на 18%, улучшить временные параметры setup на 17% и hold почти на 20%. Эти результаты достигнуты при приемлемых затратах: увеличение площади на 3%, рост энергопотребления на 5,5% и увеличение длины проводов CTS на 17%, что привело лишь к росту общей длины проводов на 0,8%.

**Ключевые слова:** перекрестные помехи, искусственный интеллект, интегральные схемы, моделирование, метод проектирования, машинное обучение.

Գ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՏԱՐԱԲՆՈՒՅԹ ՊՐՈՑԵՍՈՐԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԱՄԱՏԵՂ  
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԱՊԱՀՈՎՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Տարաբնույթ պրոցեսորային ինտեգրալ սխեմաների աշխատանքի համատեղմամբ համակարգերը, որոնք ներառում են ընդհանուր նշանակության պրոցեսորային միջուկներ, գրաֆիկական պրոցեսորներ, հաշվարկների արագացման համար նախատեսված միջուկներ և այլն, ներկայումս համարվում են շատ հեռանկարային, քանի որ միաժամանակ ապահովում են գերբարձր արագագործություն և ցածր էներգասպառում: Նման համակարգերում կիրառական ծրագրային փաթեթների բարձր արդյունավետության ապահովման համար կարևոր է տարաբնույթ պրոցեսորային ինտեգրալ սխեմաների աշխատանքը զուգահեռականացնող թարգմանիչի առկայությունը: Առաջարկվում է նմանատիպ համակարգերի հետ համագործակցող թարգմանիչի ստեղծման մեթոդ, որն ապահովում է համակարգի բարձր արտադրողականություն և ցածր էներգասպառում:

**Առանցքային բառեր.** պրոցեսորային միջուկ, ինտեգրալ սխեմա, թարգմանիչ, զուգահեռականացում, համատեղ աշխատանք:

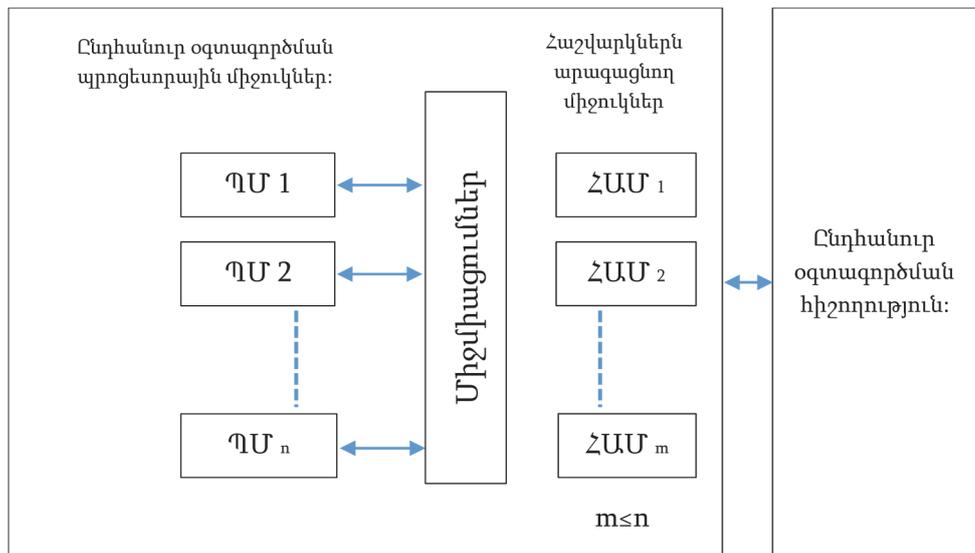
**Ներածություն.** Վերջին տարիներին մշակվել են բազմաթիվ տարաբնույթ պրոցեսորային ինտեգրալ սխեմաների աշխատանքի համատեղմամբ համակարգեր (ՏՊԻՄԱՀՀ) [1]: Սակայն ՏՊԻՄԱՀՀ-երում իրականացվող կիրառական ծրագրերի կատարման զուգահեռականացումը չափազանց աշխատատար է և բարդ: Այդ պատճառով նման համակարգերում ընդգրկված բազմաթիվ պրոցեսորային միջուկների աշխատանքի միաժամանակականացման համար վերջիններիս աշխատանքը զուգահեռականացնող թարգմանիչի (ԶԹ) մշակման անհրաժեշտություն է առաջացել: Այն կարող է, տվյալների փոխանցման վերադրումները հաշվի առնելով, հաջորդաբար կատարվող առաջադրանքները ավտոմատ եղանակով զուգահեռականացնել: Այդպիսի ԶԹ-ի առկայությունը էապես կնվազեցնի ՏՊԻՄԱՀՀ-ի կիրառական ծրագրային ապահովման մշակման համար անհրաժեշտ ժամանակը: ՏՊԻՄԱՀՀ-ի ԶԹ-ն կարող է պլանավորել և կազմակերպել տարաբնույթ պրոցեսորային միջուկներով իրականացվող առաջադրանքների կատարման ժամանակացույցը:

ՏՊԻՄԱՀՀ-ի ԶԹ-ների ստեղծման կարևորության մասին է վկայում այն հանգամանքը, որ ներկայումս այդ ուղղությամբ իրականացվում են ինտենսիվ աշխատանքներ: Օրինակ, [2]-ում առաջարկվել է ռեսուրսների հասանելիության սահմա-

նափակմամբ առաջադրանքների պլանավորում՝ էվրիստիկ ալգորիթմներ: Սակայն դրանք չեն բավարարում ՏՊԻՄԱՀՀ-ի ՁԹ-ներին ներկայումս առաջադրվող պահանջները, քանի որ դրանք անհրաժեշտ աստիճանի չեն զուգահեռականացնում գործընթացները:

Ուստի առաջարկվում է տարաբնույթ պրոցեսորային ինտեգրալ սխեմաների համատեղ աշխատանքի ապահովման մեթոդ, որն իրագործվել է ՁԹ-ի տեսքով և հիմնված է պրոցեսորային միջուկներով կատարվող առաջադրանքների ստատիկ պլանավորմամբ զուգահեռականացման վրա:

**Տարաբնույթ պրոցեսորային ԻՄ-երի համատեղ աշխատանքն ապահովող համակարգի ճարտարապետությունը:** Առաջարկվող զուգահեռ թարգմանության մեթոդում ՁԹ-ն ընդհանուր օգտագործման պրոցեսորային միջուկները խմբավորում է այնպես, որ հնարավոր լինի առավելագույնս արդյունավետ իրագործել հիերարխիական զուգահեռականացումը: Պրոցեսորային միջուկների այսպիսի խմբավորման ժամանակ հաշվարկներն արագացնող միջուկները չեն ընդգրկվում ընդհանուր օգտագործման պրոցեսորային միջուկների խմբում: Դա ՁԹ-ին հնարավորություն է ընձեռում լավարկել հաշվարկներն արագացնող միջուկների հասանելիությունը նույնիսկ այն դեպքում, երբ դրանց քանակն ավելի փոքր է ընդհանուր օգտագործման պրոցեսորային միջուկների թվից: Այնուհետև ՁԹ-ն կիրառում է ՏՊԻՄԱՀՀ-ի համար հարմարեցված ստատիկ պլանավորման եղանակը և առաջադրանքների կատարման ժամանակահատվածների վերաձաձկումներ հաշվի առնելով՝ օպտիմալացնում է տվյալների փոխանցման ժամանակները: Մշակված ՏՊԻՄԱՀՀ-ի ճարտարապետությունում (նկ.1) հաշվարկների արագացման համար նախատեսված յուրաքանչյուր միջուկին համապատասխանեցվում է պարզագույն պրոցեսորային միջուկ, որը կառավարում է այն: Այդ կառավարող միջուկը հնարավոր է դարձնում միջուկներով կատարվող առաջադրանքների տարանջատումն այնպես, որ դրանք կարողանան կատարվել հաշվարկներն արագացնող միջուկների միջոցով: Այդ հանգամանքն էլ հնարավոր է դարձնում ստատիկ պլանավորման կիրառումը: Բացի այդ, ՏՊԻՄԱՀՀ-ի յուրաքանչյուր միջուկ ունի հիշողության նույն ճարտարապետությունը: Հիշող սարքերի նման միատեսակությունը հնարավոր է դարձնում ստատիկ պլանավորման իրականացումը՝ միաժամանակ ՁԹ-ի միջոցով օպտիմալացնելով հիշողությունը և տվյալների հաղորդումը:

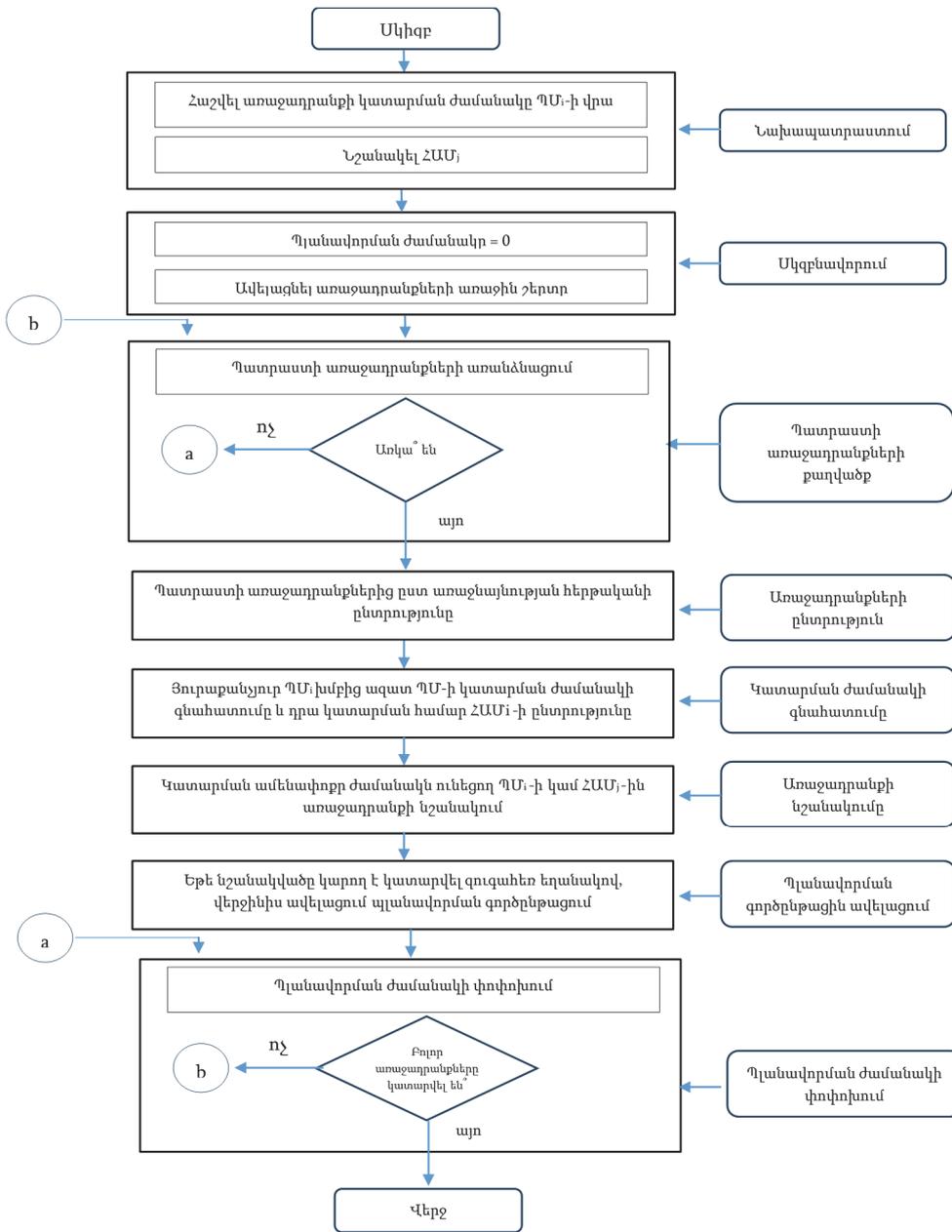


Նկ. 1. ՏՊԻՍԱՀՀ-ի ճարտարապետությունը

Առաջարկված ՏՊԻՍԱՀՀ-ի ճարտարապետությունում (նկ. 1) առկա են բազմաթիվ ընդհանուր օգտագործման պրոցեսորային միջուկներ (ՊՄ), որոնք միջմիացումների միջոցով փոխգործակցում են հաշվարկներն արագացնող միջուկների (ՀԱՄ) հետ, իսկ հիշողությունն ընդհանուր օգտագործման է:

**Առաջարկվող մեթոդը: Տարաբնույթ պրոցեսորային ԻՍ-երի համատեղ աշխատանքն ապահովող համակարգում առաջադրանքների պլանավորման մեթոդը.**

Առաջարկվող պլանավորման մեթոդում (նկ. 2) հաշվի են առնվում կատարվող առաջադրանքների, ՊՄ-երի և ՀԱՄ-երի բնութագրերն ու պարամետրերը: Որոշ առաջադրանքներ կարող են տրվել ՀԱՄ-երին, բայց հնարավոր է նաև այնպիսի առաջադրանքների առկայություն, որոնք հնարավոր չէ առաջադրել ՀԱՄ-երին: Նմանատիպ առաջադրանքները առաջադրվում են ՊՄ-երին: Ի տարբերություն ՀԱՄ-երի՝ ՊՄ-երին կարող են տրվել բոլոր տիպերի առաջադրանքները: Դեպքերի մեծ մասում հնարավոր է լինում առաջադրանքների տալը ՀԱՄ-երին: Որքան այդպիսի դեպքերի մասնաբաժինը ընդհանուրում մեծ է, այնքան ավելի բարձր է առաջարկվող մեթոդի արդյունավետությունը, այսինքն՝ այնքան ավելի փոքր է բոլոր առաջադրանքների կատարման ընդհանուր ժամանակը:



Նկ. 2. ՏՊԻՄԱՀՀ-ի պլանավորման մեթոդը

Առաջարկված ՏՊԻՄԱՀՀ-ի պլանավորման մեթոդում (նկ. 2) տվյալների հաղորդման ավարտի  $t_{տհ}$  պահը և առաջադրանքի կատարման ավարտի  $t_{ակ}$  պահը որոշվում են հետևյալ կերպ՝

$$t_{uh} = \max(t_{up}, \max[t_{um}]), \quad (1)$$

$$t_{uq} = \max(t_{uq}, t_{up}) + \sum_{i=1}^k t_{uqi} + \sum_{j=1}^l t_{uhj}, \quad (2)$$

որտեղ  $t_{uq}$  -ն տվյալների բեռնավորման,  $t_{um}$  -ն տվյալների ուղարկման,  $t_{uq}$  -ն տվյալների ազատման,  $t_{uqi}$  -ն  $i$ -րդ առաջադրանքի կատարման,  $t_{uhj}$  -ն  $j$ -րդ ՀԱՄ-երով տվյալների հաղորդման ժամանակներն են,  $k$ -ն՝ կատարվող առաջադրանքների,  $l$ -ը՝ ՀԱՄ-երի քանակները:

**Փորձարարական արդյունքները.** Մշակված մեթոդը փորձարկվել է ՏՊԻՄԱՀՀ-ի մի քանի օրինակների միջոցով, որոնք պարունակում են համապատասխանաբար 8, 16 և 32 ՊՄ-եր և 4, 10, 12 ՀԱՄ-եր: Առաջարկված մեթոդի կիրառման պարագայում միապրոցեսորային համակարգի համեմատ ստացվել է մեքենայական ժամանակի համապատասխանաբար 8,56 14,05 և 23,19 անգամ փոքրացում:

**Եզրակացություն.** Տարբնույթ պրոցեսորային ինտեգրալ սխեմաների համատեղ աշխատանքի ապահովման մշակված մեթոդը և զուգահեռականացնող թարգմանիչն ապահովում են առաջադրանքների կատարման ժամանակի մինչև մի քանի տասնյակ անգամ փոքրացում:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Topcuoglu, H., Hariri, S., Wu, M.Y.** Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. -2022. -13.-P. 260-274.
2. Multigrain parallel processing on compiler cooperative chip multiprocessor / **K. Kimura, Y. Wada, H. Nakano, T. Kodaka, et al** // Proceedings of the 9th Annual Workshop on Interaction between Compilers and Computer Architectures. -2024-P.II-20

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 03.06.2025:

**Г.А. АРУТЮНЯН**

#### МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РАЗНОТИПНЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Системы, основанные на интеграции разнотипных процессорных интегральных схем, которые включают процессорные ядра общего назначения, графические процессоры, ядра для ускорения вычислений и др., в настоящее время считаются весьма перспективными, так как одновременно обеспечивают сверхвысокую производительность и низкое энергопотребление. В таких системах для обеспечения высокой эффек-

тивности прикладных программных пакетов важное значение имеет наличие компилятора, параллелизирующего работу разнотипных процессорных интегральных схем. Предлагается метод создания такого компилятора, взаимодействующего с подобными системами и обеспечивающего высокую производительность системы при низком энергопотреблении.

**Ключевые слова:** процессорное ядро, интегральная схема, компилятор, параллелизация, совместная работа.

**G.A. HARUTYUNYAN**

### **A METHOD FOR ENSURING THE JOINT OPERATION OF HETEROGENEOUS PROCESSOR INTEGRATED CIRCUITS**

Systems based on the integration of heterogeneous processor integrated circuits, which include general-purpose processor cores, graphics processors, computation acceleration cores, and others, are currently considered highly promising, as they provide both ultra-high performance and low energy consumption. In such systems, to ensure high efficiency of application software packages, the presence of a parallelizing compiler for heterogeneous processor integrated circuits is of great importance. A method is proposed for creating a compiler that collaborates with such systems, ensuring high system performance and low energy consumption.

**Keywords:** processor core, integrated circuit, compiler, parallelization, joint operation.

О.Н. ГАСПАРЯН, Л.М. БУНИАТЯН, Г.А. МЕЛКОНЯН,  
А.Г. ГРИГОРЯН

### ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАТФОРМЫ СТЮАРТА ПРИ АДДИТИВНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯХ

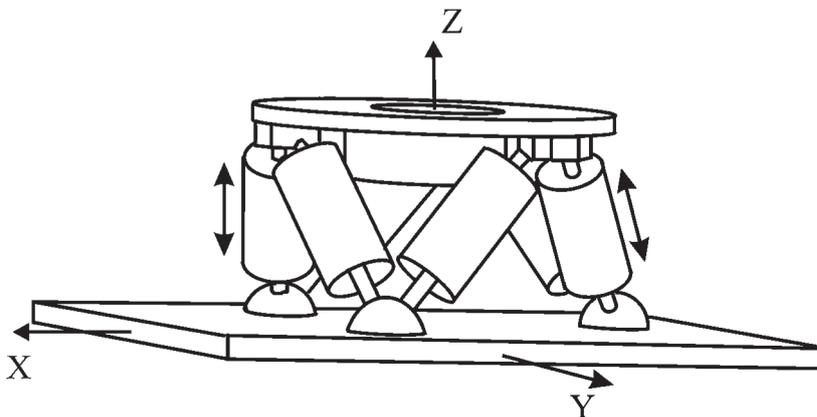
Получены простые графические критерии анализа робастной устойчивости многомерной системы управления платформой Стюарта (гексапода) по отношению к аддитивным неопределенностям параметров системы. Изложение основано на методе характеристических передаточных функций, который дает возможность свести анализ устойчивости многомерной системы к анализу независимых систем с одним входом и одним выходом. Предлагаемый критерий робастности графически представляет собой запретную окружность на комплексной плоскости характеристических годографов системы. Приведен числовой пример анализа робастности системы управления гексаподом.

**Ключевые слова:** платформа Стюарта, гексапод, система управления, робастность, аддитивная неопределенность.

**Введение.** Вопросы робастности систем управления по отношению к внешним возмущениям или неопределенностям параметров всегда были одними из центральных в современной теории управления систем с обратной связью [1, 2]. Статья посвящена инженерным методам исследования робастной устойчивости многомерной системы управления платформой Стюарта по отношению к аддитивным возмущениям параметров.

Платформа Стюарта, также называемая гексаподом, была первоначально изобретена в 1950-х годах В.Э. Гауфом (V.E. Gough) для испытания автомобильных шин, но получила широкую известность в 1965 году как платформа Стюарта после того, как Д. Стюарт предложил использовать её в качестве лётного симулятора [3, 4]. С тех пор эта конструкция нашла широкое применение в самых разных отраслях, таких как аэрокосмическая и оборонная промышленность, автомобилестроение и судостроение, мостостроение и станкостроение и др. Гексаподы также используются для позиционирования антенн спутниковой связи и телескопов, в системах виброизоляции и т.д. [5]. Конструктивно гексаподы представляют собой платформу с полезной нагрузкой, установленную на шести объединенных попарно стойках, каждая из которых

может изменять свою длину при помощи специальных линейных приводов. Схематически это показано на рис. 1. В дальнейшем для простоты под гексаподом обычно будем понимать платформу с полезной нагрузкой.



*Рис. 1. Кинематическая схема гексапода*

В общем случае гексаподы обеспечивают шесть степеней свободы (три вращательные и три линейные). Если же каждая пара стоек работает синхронно на уменьшение или увеличение своей длины, то гексаподы имеют три вращательные и одну линейную (вдоль вертикальной оси  $Z$ ) степени свободы.

В настоящей статье мы ограничимся для краткости рассмотрением только последнего случая. Все полученные результаты могут быть легко распространены на случай систем управления гексаподами с шестью степенями свободы.

**Система управления платформой Стюарта.** Система управления платформой Стюарта (гексапода) относится к многомерным системам управления, т.е. системам управления с несколькими входами и выходами и взаимными связями между отдельными каналами [6-8].

Для выбранного варианта гексапода с четырьмя степенями свободы четырехмерную систему управления можно условно разделить на две независимые системы (подсистемы). Первая из них является одномерной и обеспечивает перемещение центра масс полезной нагрузки вдоль вертикальной оси  $Z$ . Вторая, трехмерная система является взаимосвязанной и предназначена для управления углового движения нагрузки вокруг центра масс по осям крена, тангажа и рыскания [8]. С учетом сказанного структурная схема системы управления гексаподом имеет вид, показанный на рис. 2, где одномерная (скалярная) система по оси  $Z$  изображена одиночными линиями, а трехмерная (векторная) взаимосвязанная система углового движения полезной нагрузки представлена двойными линиями.

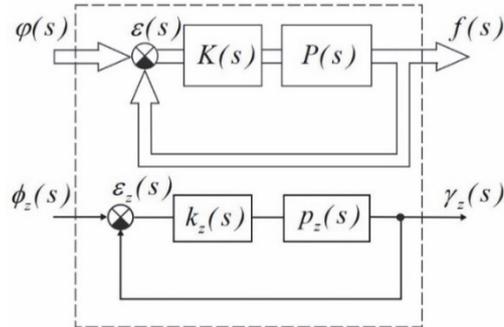


Рис. 2. Четырехмерная система управления гексаподом

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $\varphi(s), f(s), \varepsilon(s)$  - трехмерные векторы входа, выхода и ошибки угловых поворотов гексапода относительно центра масс;  $\phi_z(s), \gamma_z(s), \varepsilon_z(s)$  - соответствующие скалярные сигналы линейных перемещений гексапода вдоль вертикальной оси  $Z$ ;

$$P(s) = \begin{pmatrix} p_0(s) & p_1(s) & p_1(s) \\ p_1(s) & p_0(s) & p_1(s) \\ p_1(s) & p_1(s) & p_0(s) \end{pmatrix} \quad (1)$$

передаточная матрица, описывающая угловые движения гексапода с учетом динамики исполнительных двигателей;  $p_z(s)$  - скалярная передаточная функция, характеризующая линейное перемещение гексапода вдоль оси  $Z$ ;  $K(s)$  - передаточная матрица регулятора угловых движений;  $k_z(s)$  - передаточная функция одномерного канала линейных перемещений вдоль оси  $Z$ .

Вид передаточной матрицы  $P(s)$  (1) обусловлен конструктивными особенностями гексапода. Данная матрица относится к классу простых симметричных матриц [8, 9]. Что касается передаточной матрицы регулятора угловых движений  $K(s)$  на рис. 1, то она выбирается обычно в той же форме, что и матрица  $P(s)$  (1), т.е. в виде простой симметричной матрицы, или же в виде скалярной матрицы  $K(s) = k(s)I$ , где  $k(s)$  - скалярная передаточная функция, а  $I$  - единичная матрица размера  $3 \times 3$ .

Укажем, что исследование независимой одномерной системы управления по вертикальной оси  $Z$  на рис. 2 не представляет никаких затруднений и может быть выполнено с использованием известных методов теории управления [1, 2]. Поэтому в дальнейшем сосредоточимся на трехмерной взаимосвязанной системе управления вращательным движением гексапода (рис. 3).

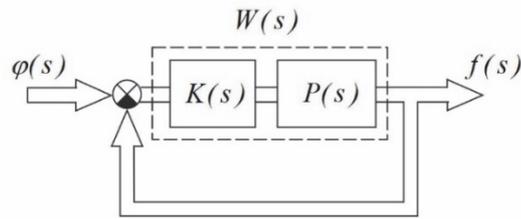


Рис. 3. Трехмерная система управления угловым движением гексапода

**Канонические представления и анализ устойчивости системы управления.** Передаточная матрица  $W(s)$  разомкнутой многомерной системы на рис. 3 имеет вид

$$W(s) = P(s)K(s). \quad (2)$$

Соответственно, передаточные матрицы замкнутой системы по выходу  $T(s)$  и ошибке  $S(s)$  имеют вид

$$T(s) = [I + W(s)]^{-1}W(s), \quad S(s) = [I + W(s)]^{-1}. \quad (3)$$

В зарубежной научно-технической литературе матрица  $S(s)$  в (3) обычно называется функцией чувствительности, а матрица  $T(s)$  - дополнительной функцией чувствительности системы управления [1, 2, 6].

Устойчивость системы управления на рис. 3 определяется распределением корней характеристического уравнения

$$\det[1 + W(s)] = 0. \quad (4)$$

Одним из наиболее эффективных методов исследования многомерных систем управления является метод характеристических передаточных функций (ХПФ) [7-10]. В соответствии с методом ХПФ, передаточные матрицы  $W(s)$  (2), и  $T(s)$ ,  $S(s)$  (3) можно представить при помощи преобразования подобия в следующих канонических формах:

$$W(s) = C(s) \text{diag}\{q_i(s)\}C^{-1}(s), \quad (5)$$

$$T(s) = C(s) \text{diag}\left\{\frac{q_i(s)}{1 + q_i(s)}\right\}C^{-1}(s); \quad S(s) = C(s) \text{diag}\left\{\frac{1}{1 + q_i(s)}\right\}C^{-1}(s), \quad (6)$$

где  $C(s)$  - модальная матрица, составленная из линейно-независимых собственных векторов  $c_i(s)$  ( $i = 1,2,3$ ) (осей канонического базиса) матрицы  $W(s)$ , а  $q_i(s)$  - ХПФ одномерных характеристических систем.

С учетом (5) и (6) характеристическое уравнение (4) принимает вид

$$\det[I + W(s)] = \det[C(s) \text{diag}\{1 + q_i(s)\}C^{-1}(s)] = \prod_{i=1}^N [1 + q_i(s)] = 0, \quad (7)$$

откуда видно, что для устойчивости замкнутой многомерной системы управления необходимо и достаточно, чтобы были устойчивыми все три одномерные характеристические системы.

Укажем, что в общем случае модальная матрица  $C(s)$  зависит от комплексной переменной  $s$ , а ХПФ  $q_i(s)$  не имеет аналитического представления [6, 7]. Однако для рассматриваемого случая системы управления гексаподом с простыми симметричными матрицами  $P(s)$ ,  $K(s)$  и  $W(s)$  канонические представления этих матриц, а также передаточных матриц  $T(s)$  и  $S(s)$  (3) имеют вид

$$P(s) = C \text{diag}\{q_{pi}(s)\}C^{-1}; \quad K(s) = C \text{diag}\{q_{ki}(s)\}C^{-1}, \quad (8)$$

$$W(s) = C \text{diag}\{q_{wi}(s)\}C^{-1}, \quad \text{где } q_{wi}(s) = q_{pi}(s)q_{ki}(s) \quad (i=1,2,3), \quad (9)$$

$$T(s) = C \text{diag}\left\{\frac{q_{wi}(s)}{1 + q_{wi}(s)}\right\}C^{-1}; \quad S(s) = C \text{diag}\left\{\frac{1}{1 + q_{wi}(s)}\right\}C^{-1}. \quad (10)$$

В выражениях (8)-(10):  $C$  - ортогональная модальная матрица, для которой обратная матрица совпадает с сопряженной (т.е.  $C^{-1} = C^*$ ) и которая не зависит от комплексной переменной  $s$ , а ХПФ  $q_{pi}(s)$  и  $q_{ki}(s)$  ( $i=1,2,3$ ) описываются простыми аналитическими выражениями [11]:

$$q_{p1}(s) = p_0(s) + 2p_1(s); \quad q_{p2}(s) = q_{p3}(s) = p_0(s) - p_1(s); \quad (11)$$

$$q_{k1}(s) = k_0(s) + 2k_1(s); \quad q_{k2}(s) = q_{k3}(s) = k_0(s) - k_1(s), \quad (12)$$

где  $k_0(s)$  и  $k_1(s)$  - элементы простой симметричной передаточной матрицы регулятора  $K(s)$ .

**Базовая модель возмущений системы и анализ робастной устойчивости системы управления при аддитивных неопределенностях.** В данном разделе в общем виде обсуждаются некоторые основные вопросы, касающиеся робастности систем управления с обратной связью [1,11]. В настоящее время существуют различные парадигмы моделирования неопределенностей динамических систем, например, структурированные, неструктурированные, параметрические и т.д. Наиболее распространенный подход к анализу влия-

ния неопределенностей на устойчивость системы управления с обратной связью предполагает, что неопределенности могут быть представлены в виде так называемой базовой модели возмущений (Basic Perturbation Model), показанной на рис. 4 [6, 11].

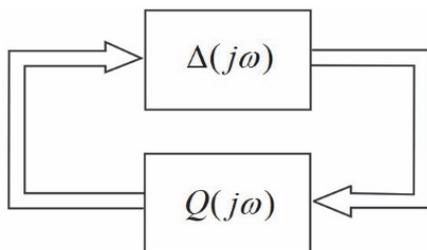


Рис. 4. Базовая модель возмущений многомерной системы управления

Здесь  $\Delta(j\omega)$  - передаточная матрица идеальной (номинальной) системы, которая предполагается устойчивой, а блок  $Q(j\omega)$  представляет собой все неопределенности в динамике системы.

Один из ключевых результатов в теории робастности основан на теореме о малом коэффициенте усиления (Small Gain Theorem) и формулируется для систем, представленных на рис. 2, следующим образом. Пусть блоки  $Q(j\omega)$  и  $\Delta(j\omega)$  устойчивы. Тогда для устойчивости многомерной системы с неопределенностью  $\Delta(j\omega)$  достаточно, чтобы для всех частот  $\omega$  выполнялось следующее условие:

$$\|Q(j\omega)\| < 1/\|\Delta(j\omega)\| \quad \forall \omega \in [-\infty, \infty], \quad (13)$$

где  $\|\cdot\|$  обозначает спектральную норму (наибольшее сингулярное число) соответствующей матрицы, или (ещё одно достаточное условие)

$$\|Q(j\omega)\|_{\infty} < 1/\|\Delta(j\omega)\|_{\infty}, \quad (14)$$

где  $\|\cdot\|_{\infty}$  обозначает норму Харди [6], которая для любой передаточной матрицы  $\Phi(j\omega)$  определяется как

$$\|\Phi(j\omega)\|_{\infty} = \sup_{\omega} \|\Phi(j\omega)\|. \quad (15)$$

Исследование робастности многомерной системы управления платформой Стюарта будет основано на применении достаточных условий (13) и (14) с учетом специфических структурных особенностей передаточных матриц

системы, среди которых принципиальное значение имеет ортогональность канонического базиса.

Два основных типа неопределённостей (возмущений), используемых в базовой модели возмущений, называются аддитивными и мультипликативными [6, 11]. Ниже рассмотрим для краткости только систему с аддитивными неопределённостями. Случай мультипликативных возмущений может быть исследован аналогично.

На рис. 5 представлена структурная схема системы управления платформой Стюарта с аддитивными неопределённостями передаточной матрицы разомкнутой системы  $W(s)$ , где последняя представлена в виде суммы номинальной (простой симметричной) матрицы  $W_0(s)$  и неопределённости  $\Delta W(s)$ , которая описывается (устойчивой) матрицей общего вида:

$$W(s) = W_0(s) + \Delta W(s). \quad (16)$$

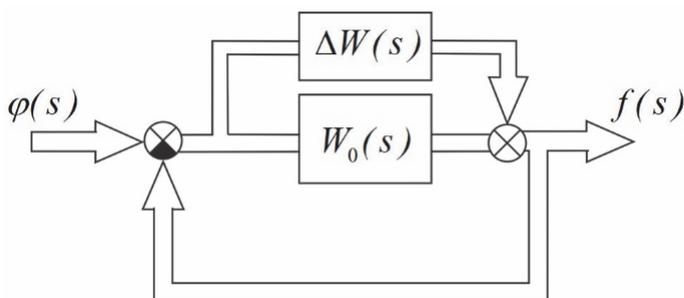


Рис. 5. Система управления платформой Стюарта с аддитивной неопределённостью передаточной матрицы  $W(s)$

Можно показать, что матрица  $Q(j\omega)$  на рис. 4 в данном случае совпадает со взятой со знаком минус функцией чувствительности  $S(j\omega)$  (3) замкнутой системы управления платформой Стюарта, т.е.  $Q(j\omega) = -S(j\omega)$ . С учетом канонического представления матрицы  $S(j\omega)$  (6) при помощи преобразования подобия структурная схема на рис. 5 может быть приведена к виду на рис. 6, а условие робастной устойчивости (13) запишется в виде

$$\left\| \text{diag} \left\{ \frac{1}{1 + q_{wi}(j\omega)} \right\} \right\| < \frac{1}{\|\Delta W_c(j\omega)\|} \quad \forall \omega \in [-\infty, \infty], \quad (17)$$

где

$$\Delta W_c(j\omega) = C^* \Delta W(j\omega) C. \quad (18)$$

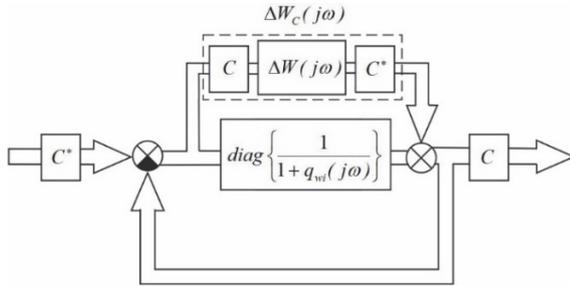


Рис. 6. Преобразованная структурная схема системы управления платформой Стюарта с аддитивной неопределенностью

Учитывая, что спектральная норма диагональной матрицы совпадает с максимальным из модулей её диагональных элементов, а также то, что преобразование подобия (или конгруэнтное преобразование) при помощи ортогональной модальной матрицы  $C$  не меняет спектральную норму матрицы, достаточное условие робастной устойчивости (17) можно переписать в виде

$$\max_i \frac{1}{|1 + q_{wi}(j\omega)|} < \frac{1}{\|\Delta W(j\omega)\|} \quad \forall \omega \in [-\infty, \infty]. \quad (19)$$

Условие (19) дает возможность исследовать робастную устойчивость системы управления платформой Стюарта при аддитивных неопределенностях передаточной матрицы разомкнутой системы, а также осуществлять выбор матричного регулятора  $K(s)$  исходя из условия обеспечения робастности при заданной матрице возмущений  $\Delta W(j\omega)$ .

Если перейти в (19) от знака неравенства на знак равенства и заменить спектральную норму  $\|\Delta W(j\omega)\|$  на норму Харди  $\|\Delta W(j\omega)\|_\infty$ , то условию робастной устойчивости можно придать простую графическую интерпретацию на плоскости характеристических годографов Найквиста разомкнутой системы. Осуществив указанные действия, после простых алгебраических преобразований получим следующее выражение:

$$[\operatorname{Re}\{q_{wi}(j\omega)\} + 1]^2 + [\operatorname{Im}\{q_{wi}(j\omega)\}]^2 = \|\Delta W(j\omega)\|_\infty^2 \quad (i=1,2,3). \quad (20)$$

На комплексной плоскости характеристических годографов номинальной разомкнутой системы  $q_{wi}(j\omega)$  ( $i=1,2,3$ ) это выражение определяет окружность с центром в точке  $\{-1, j0\}$  и радиусом  $r = \|\Delta W(j\omega)\|_\infty$  (рис. 7). Условие робастной устойчивости будет выполняться, если ни один из характеристических годографов разомкнутой системы не будет заходить в “запретную” окружность (20).

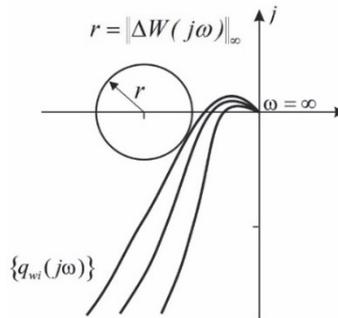


Рис. 7. “Запретная” окружность на плоскости характеристических годографов  $q_{wi}(j\omega)$

Полученное графическое условие робастной устойчивости на рис. 7 дает более консервативную оценку по сравнению с условием (19), так как зависящая от частоты  $\omega$  спектральная норма  $\|\Delta W(j\omega)\|$  заменяется на её максимальное значение  $\|\Delta W(j\omega)\|_{\infty}$ . Однако это позволяет использовать для выбора требуемого регулятора  $K(s)$  системы управления платформой Стюарта стандартные подходы классической теории регулирования, в частности, логарифмические характеристики на плоскости Бode и диаграммы Никольса [1,2].

**Числовой пример.** В качестве примера анализа робастности системы управления платформой Стюарта рассмотрим систему со следующими передаточными функциями  $p_0(s)$  и  $p_1(s)$  простой симметричной матрицы разомкнутой системы  $P(s)$  (1):

$$p_0(s) = \frac{500000}{s(s+20)(s+100)}, \quad p_1(s) = \frac{500}{s(s+20)}. \quad (21)$$

ХПФ  $q_{pi}(s)$  и  $q_{ki}(s)$  ( $i=1,2,3$ ) (11) объекта регулирования при этом имеют следующий вид:

$$q_{w1}(s) = \frac{10(s+600)}{s(s+20)(s+100)}, \quad q_{w2}(s) = q_{w3}(s) = \frac{-500(s-900)}{s(s+20)(s+100)}. \quad (22)$$

Замкнутая система управления при заданных передаточных функциях  $p_0(s)$  и  $p_1(s)$  (21) является неустойчивой, так как характеристические годографы Найквиста ХПФ (22), показанные на рис. 8 штриховыми линиями, охватывают критическую точку  $-1, j0$ .

Ставится задача выбора скалярного пропорционально-дифференцирующего регулятора с фильтром первого порядка (ПДФ), при котором система

управления платформой Стюарта является устойчивой при заданной аддитивной неопределенности передаточной матрицы разомкнутой системы с нормой Харди  $\|\Delta W(j\omega)\|_{\infty} = 0.65$ .

Расчеты, осуществленные графическим интерфейсом пользователя MIMOSysCAD, показали, что данным требованиям удовлетворяет ПДФ-регулятор с передаточной функцией

$$k(s) = 0.216 + 0.00969 \frac{s}{0.00026s + 1} = \frac{37.472(s + 22.21)}{s + 3845}. \quad (23)$$

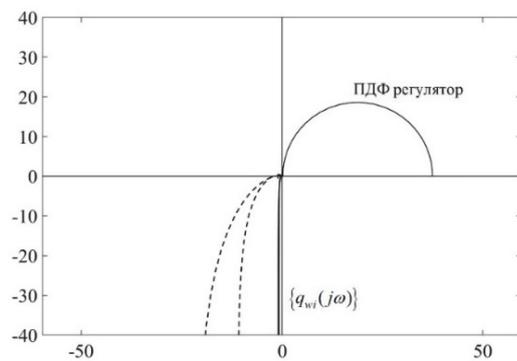


Рис. 8. Характеристические годографы разомкнутой системы

На рис. 9 показаны характеристические годографы разомкнутой системы с окружностью с центром в точке  $-1, j0$ , которая касается годографа  $q_{w1}(j\omega)$  при радиусе  $r = 0.695$ , что удовлетворяет поставленным требованиям.

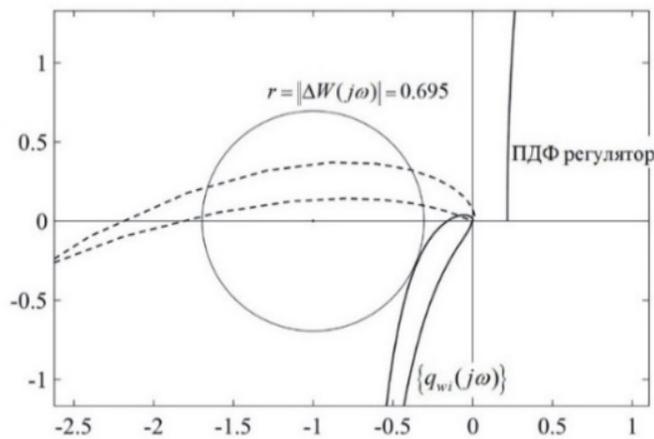


Рис.9. Характеристические годографы разомкнутой системы (укрупненный вид) с окружностью, касательной годографа  $q_{w1}(j\omega)$  при  $r = 0.695$

На рис. 10 показаны переходные процессы скорректированной системы управления платформой Стюарта при единичных входных воздействиях.

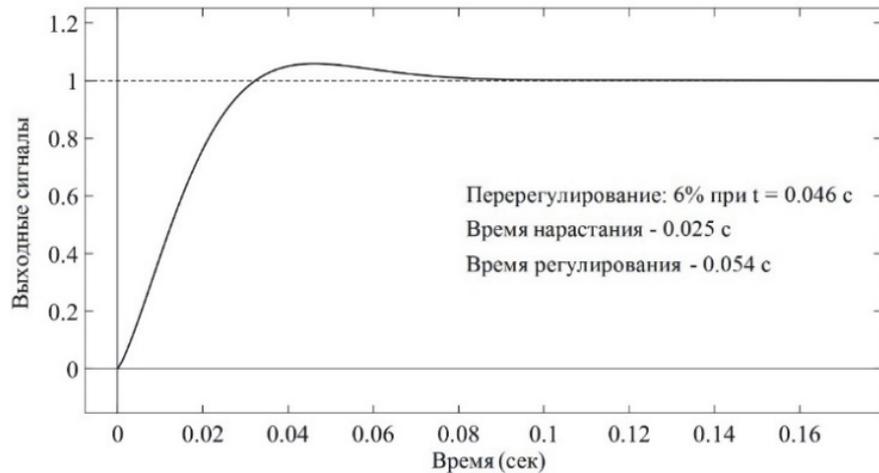


Рис. 10. Реакция замкнутой системы на единичные входные воздействия

**Заключение.** Получены простые графические критерии анализа робастной устойчивости многомерной системы управления платформой Стюарта по отношению к аддитивным неопределенностям параметров. Изложение основано на методе характеристических передаточных функций, который дает возможность свести анализ устойчивости многомерной системы к анализу независимых систем с одним входом и одним выходом.

Основной структурной особенностью системы управления платформой Стюарта является ортогональность канонического базиса простой симметричной передаточной матрицы системы. Это позволяет выразить условие робастной устойчивости в каноническом базисе непосредственно через норму Харди матрицы аддитивной неопределенности в исходном базисе системы.

Предлагаемый критерий робастности графически представляет собой определенную "запретную" окружность на комплексной плоскости характеристических годографов разомкнутой системы. Приведен числовой пример выбора необходимой коррекции и дан анализ робастности системы управления платформой Стюарта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dorf R.C., & Bishop R.H.** Modern Control Systems. - Pearson Education Inc, Published by Pearson, July 29, 2024. - 835 p.
2. **Norman N.S.** Control Systems Engineering. - Seventh edition. - California State Polytechnic University, Panama, Wiley, 2015.-944 p.

3. **Stewart D.** A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the IMechE. - 1965-66.-Vol. 180, pt. 1, No. 15.- P. 371-385.
4. **Gough V.E. and Whitehall S.G.** Universal tyre test machine // Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress. - May, 1962.-P. 117-137.
5. **Szafnarowski F.** Stewart platform with fixed rotary actuators: a low-cost design study. -Bielefeld University, Germany, 2013.-11 p.
6. **Skogestad S. and Postlethwaite L.** Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. - John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Sussex, UK, 2005.-608 p.
7. **Maciejowski J.M.** Multivariable Feedback Design. - Addison-Wesley, Wokingham, U.K., 1989.-448 p.
8. **Gasparyan O.N.** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach. - John Wiley & Sons Ltd UK, 2008.-375 p.
9. **Gasparyan O.N., Ulikyan A.** Multivariable Control System of the Stewart Platform // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). - October. 2020.-P.13-17.
10. **Macfarlane A.G. & Belletrutti J.J.** The characteristic locus design method // Automatica. -1970.-Vol. 9, No5.- P. 575-588.
11. **Zhou K. and Doyle J.C.** Essentials of Robust Control. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.-425 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 26.11.2025.

**Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Լ.Մ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Գ.Ա. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ,  
Ա.Հ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ**

**ՍՏՅՈՒԱՐՏԻ ՀԱՐԹԱԿԻ ՌՈԲԱՍՏ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԱՂԻՏԻՎ  
ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Արտածվել են Ստյուարտի հարթակի (հեքսապոդի) բազմաչափ կառավարման համակարգի ռոբաստ կայունության վերլուծության պարզ գրաֆիկական չափանիշներ՝ համակարգի պարամետրերի աղիտիվ անորոշությունների նկատմամբ: Դիտարկումը հիմնվում է բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդի վրա, որը հնարավորություն է տալիս բազմաչափ կառավարման համակարգերի կայունության վերլուծությունը հանգեցնել մեկ մուտքով և մեկ ելքով իրարից անկախ համակարգերի վերլուծությանը: Ռոբաստության առաջարկվող չափանիշը գրաֆիկորեն ներկայացնում է «արգելված» շրջանակներ համակարգերի բնութագրիչ հոդոգրաֆների կումլեքս հարթության վրա: Բերված է հեքսապոդի կառավարման համակարգի ռոբաստության վերլուծության թվային օրինակ:

**Առանցքային բառեր.** Ստյուարտի հարթակ, հեքսապոդ, կառավարման համակարգ, ռոբաստություն, աղիտիվ անորոշություն:

**O.N. GASPARYAN, L.M. BUNIATYAN, G.A. MELKONYAN, A.H. GRIGORYAN**  
**INVESTIGATING THE ROBUST STABILITY OF THE STEWART PLATFORM**  
**UNDER ADDITIVE UNCERTAINTIES**

Simple graphical criteria for analyzing the robust stability of a multivariable control system for a Stewart platform (hexapod) with respect to additive uncertainties of the system's parameters are presented. The research is based on the characteristic transfer functions method, which allows to reduce the stability analysis of a multivariable system to the analysis of independent systems with one input and one output. Graphically, the proposed robustness criterion represents a "forbidden" circle on the complex plane of the characteristic hodographs of the open-loop system. A numerical example of the robustness analysis of the hexapod's control system is presented.

**Keywords:** Stewart platform, hexapod, control system, robustness, additive uncertainties.

A.G. HARUTYUNYAN, R. N. KHACHATRYAN

**COARSE-GRAINED PARALLELIZATION OF THE SPANNING GRAPH  
CONSTRUCTION ALGORITHM**

The spanning graph construction problem is to create a sparse graph over a given set of points so that the graph contains at least one minimum spanning tree under a specified distance metric. This problem is the basis for many algorithms like rectilinear minimum spanning tree construction, efficient Steiner tree construction, obstacle aware Steiner tree construction, etc. These algorithms are used in many fields of computer science, especially in VLSI routing. As many of these algorithms are NP-complete problems and some of them use the spanning graph construction approach, parallelization of the spanning graph construction algorithm will optimize other problems as well. In this paper, we present the coarse-grained parallelization approach of the spanning graph construction algorithm. The proposed algorithm, compared to the existing sequential algorithm, achieves an average performance improvement of about 40-60% and keeps the correctness of the original algorithm.

**Keywords:** minimum spanning tree, rectilinear distance, parallelization, coarse-grained parallelization, VLSI Design, Sweep-line algorithm.

**Introduction.** The concept of a spanning graph is defined as a sparse graph that contains at least one minimum spanning tree. Unlike a complete graph, which contains all possible edges, a spanning graph includes only a subset of edges but still guarantees that a minimum spanning tree can be extracted from it. This makes spanning graphs useful for reducing computational complexity in minimum spanning tree (MST) related problems.

The concept of a spanning graph was introduced by Zhou, et al [1]. This idea was applied in their algorithm for constructing rectilinear minimum spanning trees (RMST), where they avoided Delaunay triangulation and used a sweep-line technique. This algorithm was used in many later works. Zhou extended this idea in [2] by using spanning graphs to construct rectilinear Steiner trees. Later, the method was applied to non-rectilinear geometries [3], showing the flexibility of the approach. It was also adapted for obstacle-aware routing, where the obstacle-aware Steiner tree was constructed on the same spanning graph idea [4,5]. The minimum spanning tree (MST) problem is one of the primary problems in computer science,

with applications in network design, geometric computations, and VLSI routing. The construction of a rectilinear minimum spanning tree (RMST) is a key problem in VLSI design, especially in routing phases, where it is used as a foundation for constructing Steiner trees and estimating wirelength in global routing.

The goal of constructing an RMST in VLSI is to connect a set of points (called pins) on a chip using rectilinear (Manhattan) lines so that the total length is minimal. Sometimes it is better to add extra points (called Steiner points) to get a shorter result. The final tree with these extra points is called a Steiner tree.

Zhou's proposed spanning graph construction approach is the basis for problems like RMST construction, efficient Steiner Tree construction, and others. Many of these problems are NP-complete, and improving the performance of this method leads to more efficient computation in algorithms that use it.

However, Zhou's approach is purely sequential. As VLSI design scales and multi-core processors become standard, there is room for parallelization. In this paper, a coarse-grained parallelization of Zhou's spanning graph construction algorithm is proposed. Coarse-grained parallelization refers to dividing a program into large, mostly independent tasks that can run in parallel. These tasks, such as separate threads or subroutines, are executed on different processor cores. Our method keeps the correctness and structure of the original algorithm but improves performance by solving independent subproblems in parallel. This makes it more practical for modern large-scale VLSI designs.

**Problem description.** Many algorithms have been introduced for computing minimum spanning trees (MST) in parallel, such as the Filter-Kruskal algorithm [6], the parallel implementation of Borůvka's algorithm [7], and others [8–10]. However, most of these do not primarily address the MST problem under the rectilinear (Manhattan) metric. This metric is especially important in the VLSI domain, where interconnections among circuits are made using rectilinear lines.

A well-known algorithm that addresses this metric is the RMST construction algorithm proposed by Zhou. This method is important because it was later used for constructing efficient Steiner trees [2]. The work combines Zhou's spanning graph construction approach with the edge substitution heuristic, resulting in a Steiner tree construction algorithm with  $O(n \log n)$  runtime complexity and simpler implementation. Later, in [3], the method was extended to non-rectilinear interconnectors, which allow 45-degree connections and can significantly reduce wire length. In that work, two algorithms were introduced. The first algorithm, called OST-E, is based on edge substitution and the second algorithm, called OST-T, is based on triple contraction. Both algorithms reuse Zhou's spanning graph construction method, adapted for octilinear geometry. These algorithms maintain  $O(n \log n)$  runtime.

Zhou's spanning graph approach was also extended in [4] to support obstacle-avoiding Steiner tree construction. By constructing an obstacle-avoiding spanning graph (OASG) and selecting only valid edges, the method ensures obstacle-free routing. In [5], this idea was improved in the EBOARST algorithm, which handles obstacles during the edge generation process. Instead of filtering after graph construction, EBOARST avoids adding unnecessary edges, making the algorithm more efficient. These works show that Zhou's spanning graph construction algorithm is used as a core part in many NP-complete problems.

In this paper, we present a coarse-grained parallelization strategy for Zhou's proposed sequential algorithm. Our method focuses only on the spanning graph construction step, which is reused in many problems. The constructed graph is then passed to Kruskal's algorithm to compute the MST.

**The proposed solution.** Zhou et, al [1] proposed rectilinear minimum spanning tree (RMST) construction algorithm, which is working in  $O(n \log n)$  time. The algorithm avoids using Delaunay triangulation, as it is not well suitable for rectilinear metric. Instead of Delaunay triangulation they use sweeping line technique and defined regions across each point from R1-R8. Using regions the algorithm identified the nearest neighbors for each point.

For each point  $p$ , the algorithm searches in his active set to find points for which  $p$  lies in their corresponding R1, R2 or R3, R4 octants. Then,  $p$  is connected to the nearest point in each of these regions, keeping the connections optimal. At the end of this phase, for each point, the algorithm removes the found points from the active set for future queries. This process has been carried out in two phases by a sweeping line by  $x + y$  and by  $x - y$ . After these two phases we have a rectilinear spanning graph (RSG) with  $O(n)$  edges, which is then passed to Kruskal's algorithm to efficiently compute the MST.

While the described algorithm has quite good performance characteristics, today's problems require work on big data sets. To address this, we designed a coarse-grained parallelization strategy for RMST construction algorithm. The two main parts of coarse-grained parallelization strategy are independent sweep lines by  $x + y$  and  $x - y$  line functions and nearest neighbor searches in corresponding regions. These two phases are independent of each other as they have their own active sets and share only a graph representing edge list, to which the only applied operation is insertion. The independent sweep line operations by  $x + y$  and  $x - y$  line functions are illustrated in Fig. 1.

Based on this, we assign two independent sweep line operations to corresponding separate threads by passing the edge list. To avoid unnecessary synchronization across threads we create separate local data structures for each

thread and pass on to functions. One of the advantages of this parallelization approach is that data across threads or processes do not need to be synchronized. And as the data structures are linked lists representing graph, we can easily merge them in  $O(1)$  time complexity, as we will do only one pointer operation when these two processes are finished. After the two phases, the final data structures are merged while maintaining consistency. The proposed algorithm, Parallelized Rectilinear Spanning Graph (PRSG), is shown in Fig. 2.

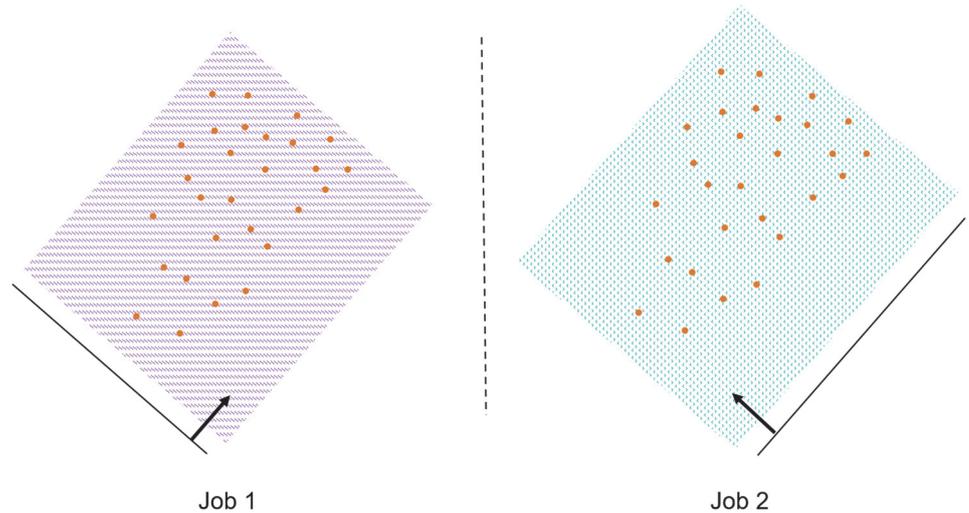


Fig. 1. The sweep line jobs parallel computation

The second part of our coarse-grained parallelization strategy is the nearest neighbor search in each of the sweeping line phases. For the  $x + y$  phase, these regions are R1 and R2 and for the  $x - y$  phase, R3 and R4 respectively. In Fig. 3, the regions for  $x + y$  sweep line phase are illustrated.

Since these regions have separate active sets and the points in active sets do not overlap, the computation can be parallelized to run independently. The same idea is applied in this part too. As each thread works with its own active set, and these data structures are not overlapping with coordinates, again we pass edge lists as local data structures for each process. By this, we avoid synchronization across threads and carry out the merging process efficiently in  $O(1)$  time.

Algorithm Parallelized Rectilinear Spanning Graph (PRSG)

1. In thread T1: Sort points by  $(x + y)$  for regions R1, R2
2. In thread T2: Sort points by  $(x - y)$  for regions R3, R4
3. Initialize two active sets for each thread.
4. Initialize local edge lists for each thread.
5. Parallel processing:

- a. In thread T1:
    - i. For each point p in sorted (x + y) order:
      1. Create a separate thread T1\_R1:
        - a. Query active set for points s where p lies in their R1 region.
        - b. Find the nearest point in the queried subset.
        - c. Add edge (p, the nearest point) to the local edge list.
        - d. Remove s from the active set.
        - e. Add p to the active set for future queries.
      2. Create a separate thread T1\_R2:
        - a. Query active set for points s where p lies in their R2 region.
        - b. Find the nearest point in the queried subset.
        - c. Add edge (p, the nearest point) to the local edge list.
        - d. Remove s from the active set.
        - e. Add p to the active set for future queries.
      3. Merge the local edge lists.
  - b. In thread T2:
    - i. (Symmetric logic for regions R3 and R4)
6. Merge the local edge lists.

*Fig. 2. Algorithm Parallelized Rectilinear Spanning Graph (PRSG)*

By applying this coarse-grained parallelization strategy, we outperformed the sequential algorithm by 40-60 percent depending on the data size making it useful for huge data sets especially routing algorithms where circuit design sizes have millions of pins. Since this is a coarse-grained approach, it scales well for larger datasets but not for a high number of threads. The required number of threads or tasks for this approach is 6.

For the future work, we plan to extend this method to higher dimensions, such as 3D space, where parallel sweeping and neighbor searches can be applied across more dimensions and threads.

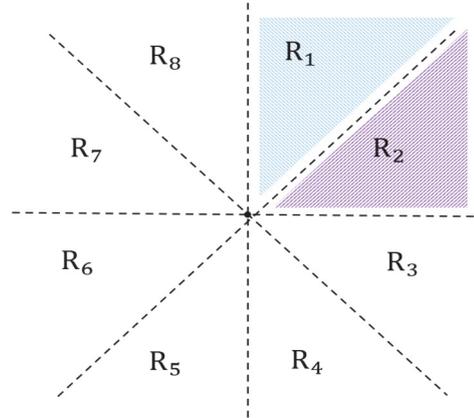


Fig. 3. The Nearest neighbor search jobs parallel computation

**Experimental results.** The program was implemented in C++ language and compared with the original sequential algorithm. Our experiments show that the parallelized spanning graph construction algorithm outperforms the sequential one on average by 40.32 percent for 10.000-100.000 points and 62.01 percent, for 100.000-600.000-point data set. The performance measurement plots are shown in Fig. 4 and 5. All experiments were conducted on a Linux server running Alma Linux 8.4 (kernel 4.18.0-425.3.1.el8.x86\_64) with an AMD EPYC 9754 processor (32 cores, 1 thread per core), 255 GiB of RAM, and g++ 8.4.1 compiler using the C++17 standard.

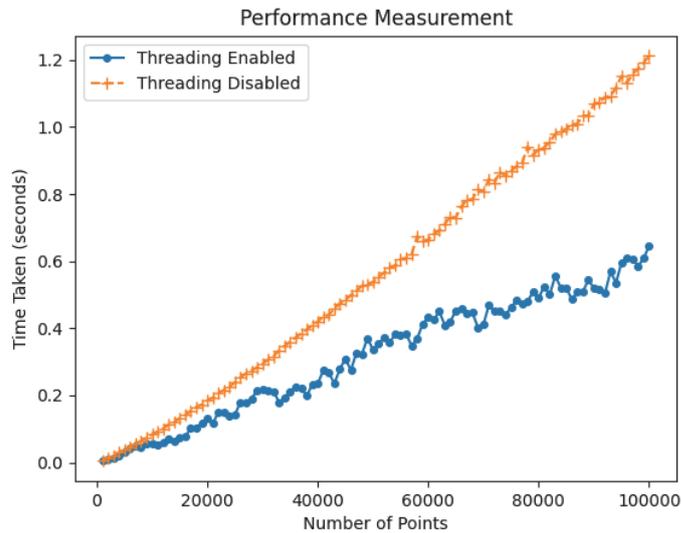


Fig. 4. Performance measurements of parallelized and sequential RSG algorithm. First data set

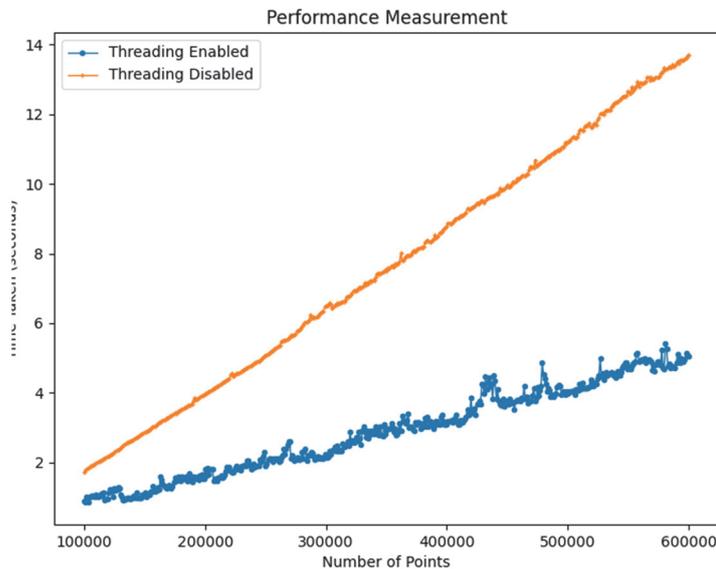


Fig. 5. Performance measurements of parallelized and sequential RSG algorithm. Second data set

**Conclusion.** In this paper, we present the parallelized version of the Rectilinear Spanning Graph (RSG) construction algorithm, which is used as a core algorithm in problems like RMST construction, efficient Steiner tree construction, and obstacle-avoiding Steiner tree construction. Our approach outperforms the original sequential algorithm by 40-60% using 6 threads, which corresponds to about 23–43% parallelization efficiency. This efficiency is not very high for small data sets because coarse-grained parallelization does not try to scale with the number of threads. It only parallelizes the parts of the algorithm that are independent. The main advantage is that the implementation is simple, assign independent sweep-line and region-finding jobs to threads, split the edge lists for each thread, and merge edge lists in  $O(1)$  time. These changes do not modify the core algorithm structure, so the method is easy to integrate while still giving a useful performance boost for large datasets. We parallelized sweep-line operations and nearest-point connection processes, avoiding shared resource synchronization by using independent data structures. This algorithm uses only 6 threads instead of other parallelization algorithms for graphs instead other MST parallelization algorithms which require huge CPU or GPU computational power. For the future work we want to extend this algorithm for RMST construction algorithm in 3D space and 3D Steiner tree construction based on that, also do fine-grained parallelization of this algorithm.

## REFERENCES

1. **Hai Zhou, Narendra Shenoy, William Nicholls.** Efficient Minimum Spanning Tree Construction without Delaunay Triangulation // Proceeding.- P. 192-197.
2. **Hai Zhou.** Efficient Steiner Tree Construction Based on Spanning Graphs // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.- May 2004. Vol. 23, no. 5.- P. 704–710.
3. Spanning Graph-Based Nonrectilinear Steiner Tree Algorithms / **Qi Zhu, Hai Zhou, Tong Jing, et. al** // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.- 2005.- Vol. 24, no. 7.- P. 1066–1075.
4. **Yung-Tai Chang, Ya-Wen Tsai, Jun-Cheng Chi, Mely Chen Chi.** Obstacle-Avoiding Rectilinear Steiner Minimal Tree Construction // Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). 2008. P. 35–38.
5. **Jieyi Long, Hai Zhou, Seda Ogresci Memik.** EBOARST: An Efficient Edge-Based Obstacle-Avoiding Rectilinear Steiner Tree Construction Algorithm // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.- 2008.- Vol. 27, no. 12.- P. 2169–2182.
6. **Osipov, Vitaly, Peter Sanders, and Johannes Singler.** The Filter-Kruskal Minimum Spanning Tree Algorithm // Proceedings of the Meeting on Algorithm Engineering and Experiments.- 2009.- P. 52–61.
7. **Sun Chung, A. Condon.** Parallel Implementation of Boruvka's Minimum Spanning Tree Algorithm // Proceedings of the International Parallel Processing Symposium.- 15 April 1996.
8. **Vasconcellos J.F. de Alencar, Cáceres E.N., Mongelli H., Song S.W.** A Parallel Algorithm for Minimum Spanning Tree on GPU // Proceedings of the 2017 International Symposium on Computer Architecture and High-Performance Computing Workshops (SBAC-PADW).- Campina- Brazil, 2017.- P. 67–72.
9. **Vasconcellos J.F. de Alencar, Cáceres E.N., Mongelli H., Song S.W.** A New Efficient Parallel Algorithm for Minimum Spanning Tree // Proceedings of the 2018 30th International Symposium on Computer Architecture and High-Performance Computing (SBAC-PAD).- Lyon, France.- 2018.- P. 107–114.
10. **Alex Fallin, Andres Gonzalez, Jarim Seo, Martin Burtscher.** A High-Performance MST Implementation for GPUs // Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '23).- 11 November 2023.- Article No. 77.- P. 1–13.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received 30.07.2025.

## Ա.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ռ.Ն. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

### ԿՄԱԽՔԱՅԻՆ ԳՐԱՖԻ ԿԱՌՈՒՑՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹԱՄԻ ԽՈՇՈՐԱՀԱՏԻԿ ԶՈՒԳԱՀԵՌԱՑՈՒՄԸ

Տրված կետերի բազմության վրա որոշված մետրիկայով նույն գրաֆ կառուցելու խնդիրը, որը պարունակում է առնվազն մեկ նվազագույն կմախքային ծառ, կոչվում է կմախքային գրաֆի կառուցման խնդիր: Այս խնդիրը հիմք է հանդիսանում մի շարք ալգորիթմների համար, ինչպիսիք են ուղղանկյուն նվազագույն կմախքային ծառի կառուցումը, Մթայների ծառի արդյունավետ կառուցումը, խոչընդոտներից խուսափող Մթայների ծառի կառուցումը և այլն: Այս ալգորիթմները կիրառվում են համակարգչային գիտության բազմաթիվ ոլորտներում, հատկապես՝ ծրագրման ալգորիթմներում: Քանի որ այս խնդիրներից շատերը NP-լրիվ են, և դրանցից մի քանիսը օգտագործում են կմախքային գրաֆի կառուցման մոտեցումը, ապա այդ պրոցեսի զուգահեռացումը կարող է օպտիմալացնել նաև մյուս խնդիրները: Ներկայացվում է կմախքային գրաֆի կառուցման ալգորիթմի բարձր մակարդակի զուգահեռացման մոտեցումը: Առաջարկվող ալգորիթմը, համեմատած առկա հաջորդական տարբերակի հետ, ապահովում է միջինում մոտավորապես 40-60% արտադրողականության աճ:

**Առանցքային բառեր.** նվազագույն կմախքային ծառ, ուղղանկյուն հեռավորություն, զուգահեռացում, գերմեծ ինտեգրալ սխեմաների նախագծում, սահող գծի ալգորիթմ:

## А.Г. АРУТЮНЯН, Р.Н. ХАЧАТРЯН

### КРУПНОЗЕРНИСТАЯ ПАРАЛЛЕЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ КАРКАСНОГО ГРАФА

Задача построения каркасного графа заключается в создании разреженного графа на заданном множестве точек таким образом, чтобы граф содержал хотя бы одно минимальное остовное дерево в соответствии с заданной метрикой расстояния. Эта задача лежит в основе множества алгоритмов, таких как построение прямоугольного минимального остовного дерева, эффективное построение дерева Штайнера, построение дерева Штайнера с учетом препятствий и др. Эти алгоритмы применяются во многих областях информатики, особенно в алгоритмах трассировки в проектировании VLSI. Поскольку многие из этих задач являются NP-полными и некоторые из них используют подход построения каркасного графа, параллелизация этого этапа может также оптимизировать и другие задачи. В данной работе представлен подход к высокоуровневой параллелизации алгоритма построения каркасного графа. Предлагаемый алгоритм, по сравнению с существующим последовательным вариантом, обеспечивает в среднем около 40...60% прироста производительности.

**Ключевые слова:** минимальное остовное дерево, прямолинейное расстояние, распараллеливание, крупнозернистый параллелизм, проектирование сверхбольших интегральных схем, алгоритм скользящей линии.

## Հ.Ս. ԱԲԳԱՐՅԱՆ

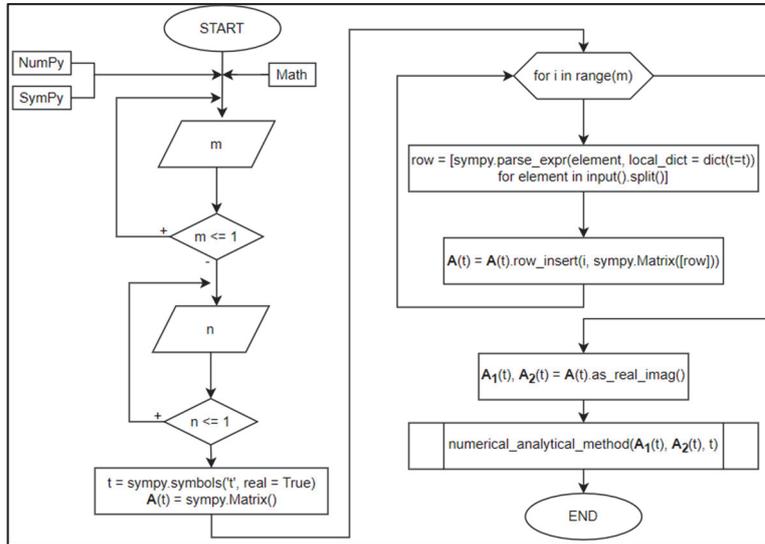
ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒՋԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ  
ՀԱԿԱՂԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ  
ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ (II)

Ներկայացված է Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման դեկոմպոզիցիոն թվա-անալիտիկ եղանակի ծրագրային իրականացումը: Համապատասխան անալիտիկ եղանակները հիմնվել են Մուր-Պենրոուզի 4-րդ պայմանի, իսկ թվա-անալիտիկ մեթոդները՝ ստացված անալիտիկ առնչությունների վրա, ինչպես նաև Պուլտովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների, որպես հիմնական մաթեմատիկական ապարատ: Հաշվողական եղանակներն իրականացվել են տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից միջոցների՝ ծրագրավորման Python լեզվի, ինչպես նաև NumPy և SymPy գրադարանների կիրառմամբ: Ծրագրային իրականացումը փորձարկվել է միապարամետրական որոշյալ մատրիցով մոդելային օրինակի միջոցով:

**Առանցքային բառեր.** Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրից, անալիտիկ լուծում, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, թվա-անալիտիկ լուծում, ծրագրավորման Python լեզու, NumPy գրադարան, SymPy գրադարան:

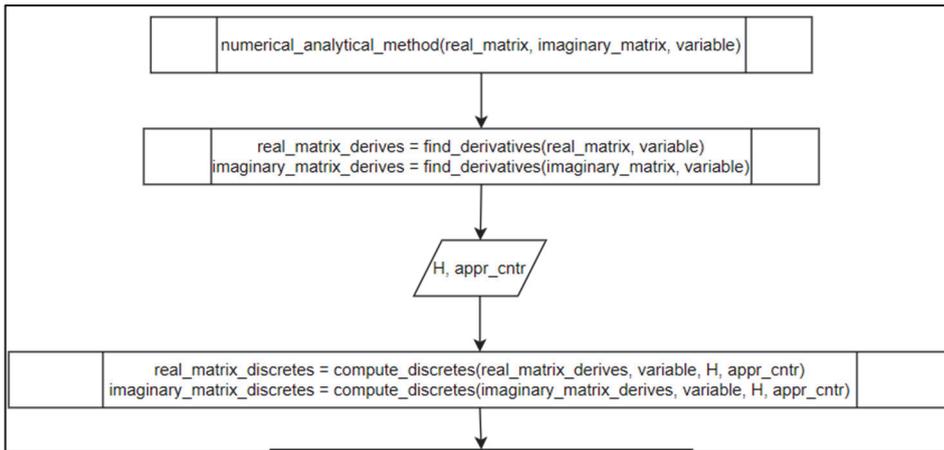
**Ներածություն:** [1] աշխատանքում առաջարկվել են կոմպլեքս միապարամետրական  $A(t)_{m \times n}$  մատրիցի՝ Մուր-Պենրոուզի ընդհանրացված հակադարձ  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցի [2] որոշման մեթոդներ, որոնցում օգտագործվել են Մուր-Պենրոուզի 1-ին, 2-րդ և 4-րդ պայմանները: Մույն աշխատանքում ներկայացվում են մշակված թվա-անալիտիկ մեթոդների ծրագրային իրականացումների ալգորիթմների բլոկ-սխեմաները և Python լեզվով գրված ծրագրային կոդերը [3]:

Ենթադրենք՝ տրված է  $A(t) \in C^{m \times n}$  մատրիցը [4, 5]: Մատրիցի չափերը մուտքագրելուց հետո անհրաժեշտ է տող-վեկտորներով մուտքագրել մատրիցի տարրերը (նկ. 1), իսկ այնուհետև՝ առանձնացնել դրանց իրական ( $A_1(t)$ ) և կեղծ ( $A_2(t)$ ) մասերի մատրիցները:



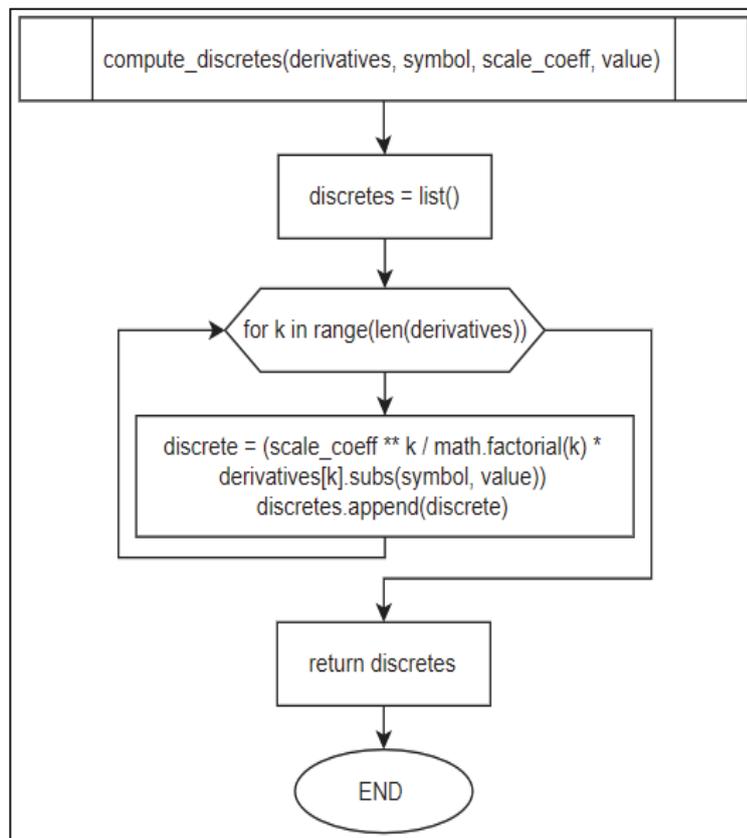
Նկ. 1. Մատրիցի չափերի և տարրերի մուտքագրման բլոկ-սխեման

**Թվա-անալիտիկ մեթոդի ծրագրային իրականացումը:**  $A(t)$  մատրիցի իրական և կեղծ մասերը որոշելուց հետո հաշվվում են դրանց տարրերի ածանցյալները՝ մինչև պահանջվող ճշտության ստացումը [6]: Հաջորդիվ,  $H$  մասշտաբային գործակցի ու  $appr\_cntr$  մոտարկման կենտրոնի արժեքները մուտքագրելուց հետո, պետք է հաշվել  $A_1(t)$  ու  $A_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները: Նկ. 2-ում ներկայացված բլոկ-սխեմայում *real\_matrix* և *imaginary\_matrix* պարամետրերը համապատասխանում են  $A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցներին, իսկ *variable* պարամետրը՝  $t$  պարամետրին:



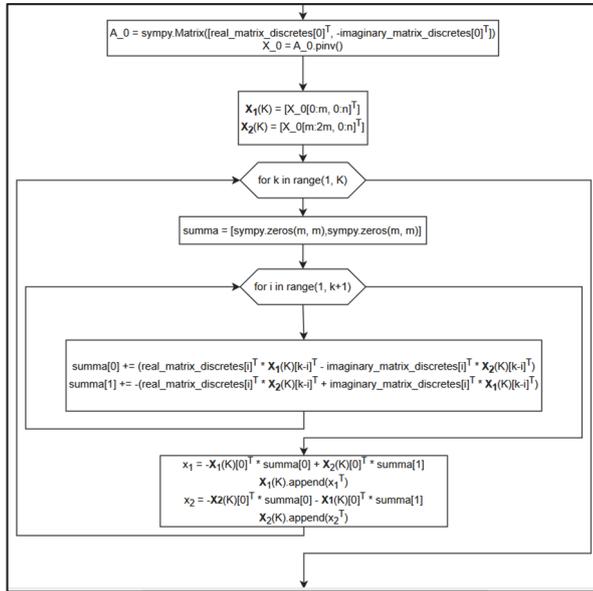
Նկ. 2. Մատրիցային դիսկրետների որոշման բլոկ-սխեման

$A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները հաշվվում են առանձին ֆունկցիայի միջոցով (նկ. 3), որի մուտքային պարամետրերն են մատրիցի տարրերի ածանցյալներից կազմված մատրիցների զանգվածը, այն փոփոխականը, ըստ որի կատարվել է ածանցումը, մասշտաբային գործակցի արժեքը, ինչպես նաև մոտարկման կենտրոնի արժեքը: Ֆունկցիան իր աշխատանքի արդյունքում վերադարձնում է մատրիցային դիսկրետների զանգվածը, որի 1-ին տարրը մուտքային մատրիցի 0-րդ կարգի դիսկրետն է, 2-րդ տարրը՝ մատրիցի 1-ին կարգի դիսկրետը և այլն:



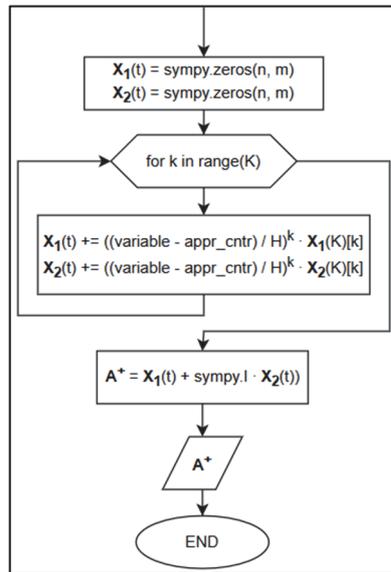
Նկ. 3. Մատրիցային դիսկրետները հաշվող ալգորիթմի բլոկ-սխեման

$A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցների մատրիցային դիսկրետները [7] հաշվելուց հետո որոշվում են  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները [1], բանաձևեր՝ [21–24]՝ մինչև պահանջվող ճշտության ստացումը (նկ. 4):



Նկ. 4.  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցների դիսկրետների հաշվարկի բլոկ-սխեման

$X_1(K)$  և  $X_2(K)$  մատրիցային դիսկրետները հաշվելուց հետո արդեն հնարավոր է վերականգնել  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցները [1, բանաձև (18)], ինչից հետո կարելի է որոշել նաև (նկ. 5) Մուր-Պենրոուզի ընդհանրացված հակադարձ  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցը [1, բանաձև (6)]:



Նկ. 5.  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցի որոշման բլոկ-սխեման

**Մոդելային օրինակ:** Ենթադրենք, տրված է հետևյալ կոմպլեքս միապարամետրական որոշյալ մատրիցը.

$$A(t) = \begin{bmatrix} (1 + jt) & jt \\ -jt & (1 - jt) \end{bmatrix}:$$

Թվա-անալիտիկ մեթոդի իրականացման արդյունքը ցույց է տրված նկ. 6-ում: Մակլորենյան մոտարկման կենտրոնի արժեքը՝  $t_0 = 0$ , մասշտաբային գործակցի արժեքը՝  $H = 1$ :

<pre>Enter mxn matrix sizes m = 2 n = 2 Matrix sizes are: m = 2, n = 2 Enter elements of A(t) matrix: 1+I*t I*t -I*t 1-I*t A1(t) = Matrix([[1, 0], [0, 1]]) A2(t) = Matrix([[t, t], [-t, -t]]) NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD Enter scaling coefficient: H = 1 Enter approximation center's value: 0 X1(K) = [Matrix([ [1, 0], [0, 1]]), Matrix([ [0, 0], [0, 0]])], Matrix([ [0, 0], [0, 0]])] X2(K) = [Matrix([ [0, 0], [0, 0]])], Matrix([ [1, 1]])], Matrix([ [0, 0], [0, 0]])] X1(t) = Matrix([[1, 0], [0, 1]]) X2(t) = Matrix([[-t, -t], [t, t]]) A+(t) = Matrix([[-I*t + 1, -I*t], [I*t, I*t + 1]])</pre>	<pre>X2(K) = [Matrix([ [0, 0], [0, 0]])], Matrix([ [1, 1]])], Matrix([ [0, 0], [0, 0]])] X1(t) = Matrix([[1, 0], [0, 1]]) X2(t) = Matrix([[-t, -t], [t, t]]) A+(t) = Matrix([[-I*t + 1, -I*t], [I*t, I*t + 1]])</pre>
---	---

Նկ. 6. Թվա-անալիտիկ մեթոդի ծրագրային իրականացման արդյունքը

**Եզրակացություն:** Ներկայացվել է Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման թվա-անալիտիկ հաշվողական եղանակի ծրագրային իրականացումը՝ տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից միջոցների կիրառմամբ: Անալիտիկ եղանակները հիմնվել են Մուր-Պենրոուզի 4-րդ պայմանի վրա, իսկ համապատասխան թվա-անալիտիկ մեթոդները՝ ստացված անալիտիկ հարաբերակցությունների, ինչպես նաև Պուլստվի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա: Ներկայացվել են ալգորիթմների բովանդակները, իսկ Python լեզվով գրված ծրագրային կոդերը տրամադրվել են որպես բաց կոդով GitHub հղում: Ալգորիթմների արդյունավետությունը փորձարկվել է միապարամետրական որոշյալ մատրիցով մոդելային օրինակի միջոցով:

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ՑԱՆԿ

1. **Симонян С.О., Аветисян А.Г., Абгарян О.С.** К определению комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза (II) // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2025. - № 1. – С. 9 – 19. <https://doi.org/10.53297/18293336-2025.1-9>
2. **Симонян С.О.** Методы определения однопараметрических обобщенных обратных матриц: Монография.- LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, Deutschland, 2017. - 222 с.
3. HovhannesAbgaryan/MoorePenrose\_IV: Software implementation of decomposition methods for determining complex 1-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrices (IV)
4. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц.- М.: Физматлит, 2010.- 560 с.
5. **Ланкастер П.** Теория матриц.- М.: Наука, 1978.- 280 с.
6. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений.- Киев: Наукова думка, 1984.-419 с.
7. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований: Монография.- Ереван: Изд-во ГИУА “Чартарагет”, 2010. – 361 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.09.2025:

### Օ.Տ. ԱԲԳԱՐՅԱՆ

#### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА- ПЕНРОУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ (II)

Представлена программная реализация численно-аналитического декомпозиционного метода определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза. Соответствующие аналитические методы основаны на 4-ом условии Мура-Пенроуза, а численно-аналитические методы - на полученных аналитических соотношениях и дифференциальных преобразованиях Пухова как основной математический аппарат. Вычислительные методы реализованы средствами современных информационных технологий с применением языка программирования Python, а также библиотек NumPy и SymPy. Программная реализация протестирована на модельном примере с однопараметрической определенной матрицей.

**Ключевые слова:** комплексная однопараметрическая обобщенная обратная матрица Мура-Пенроуза, аналитическое решение, дифференциальные преобразования, численно-аналитическое решение, язык программирования Python, библиотека NumPy, библиотека SymPy.

H.S. ABGARYAN

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINING COMPLEX ONE-PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE MATRICES USING DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS (II)**

Software implementation of numerical-analytical decomposition methods for determining complex one-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrices are presented. The corresponding analytical methods are based on the 4<sup>th</sup> Moore-Penrose condition, and the numerical-analytical methods are based on the obtained analytical relations and differential Pukhov transformations as primary mathematical apparatus. Computational methods are implemented using modern information technologies: Python programming language, as well as NumPy and SymPy libraries. The software implementation is tested on a model example with a one-parameter determined matrix.

**Keywords:** complex one-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrix, analytical solution, differential transformations, numerical-analytical solution, Python programming language, NumPy library, SymPy library.

М.Г. СТАКЯН, Н.В. ПИРУМЯН, А.Ю. САФАРЯН

**ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ  
НАПРЯЖЕНИЙ**

Рассматривается влияние концентрации напряжений, как приоритетного фактора в условиях комплексного воздействия ряда основных факторов (режима нагружения, материаловедческого, масштабного, поверхностных микронеровностей, упрочнения и суммарного процесса), на сопротивление усталости строительных конструкций, которое оценивается соответствующими относительными коэффициентами и исходным пределом выносливости. Для оценки данной взаимосвязи представлена многопараметрическая функциональная связь. Построена номограмма для расчета оптимальных параметров, относительных коэффициентов и их применения в расчетных процедурах

**Ключевые слова:** строительная конструкция, сопротивление усталости, действующий фактор, концентрация напряжений, номограмма.

**Введение.** Проектирование, создание и совершенствование конструкций и технологического оборудования – это творческий процесс, продиктованный современными потребностями в определенной сфере человеческой деятельности. Конструкции должны соответствовать современному уровню техники, быть конкурентоспособными, обеспечить решения предложенных задач с минимальной материалоемкостью и финансовыми затратами. Такой подход предполагает повторное проектирование конструкций и выбор из них оптимального варианта, который должен иметь современный вид.

Развитие техники и непрерывное совершенствование строительных конструкций (местные и маршрутные газотранспортные системы – ГТС) в связи с предложением многофункциональных задач в значительной степени осложняют расчетный процесс и требуют применения методов автоматического проектирования для решения трудоемких задач и многопараметрического учета действующих факторов. Уточнение расчетных процедур конструкций связано с предварительным исследованием их режимов нагружения, которые носят неслучайный и сложно-циклический характер, вызванный комплексным воздействием значительного числа внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся: режим производственного цикла конструкции, дневные и

сезонные отклонения погоды, атмосферное воздействие, вибрации и сейсмичность среды, а также применение упрочняющих технологий. К внутренним относятся: геометрические формы элементов, тип соединений (участки сварных швов трубопроводов ГТС), микроструктурное состояние материала, микрогеометрия рабочих поверхностей и концентрации напряжений в элементах конструкций. В итоге ответственные элементы и соединения конструкций работают в режиме циклического сложно-напряженного состояния, и их отказы в подавляющем большинстве случаев носят усталостный характер (примерно 75%). Поэтому в целях повышения уровня эксплуатационной надежности конструкций необходимо выполнить методы вероятностных расчетов с применением принципов математической статистики и параметрической надежности, обеспечивающих уровень надежности неразрушения примерно на  $P(N) = 0,96 \dots 0,99$  [1-3].

Для изучения процессов усталостного разрушения, которое является основным показателем несущей способности конструкций, выполнен большой объем теоретических и экспериментальных исследований [4-7] с целью выявления уровня воздействия каждого из вышеуказанных факторов, а результаты сгруппированы, и параметры каждого фактора в отдельном виде представлены в справочной литературе. Использование в конструкциях низко- и среднеуглеродистых сталей предполагает применение упрочняющих технологий, благодаря которым несущая способность элементов, в зависимости от степени пластичности материалов, повышается примерно на 150...200%, а срок службы – в 2,0...2,5 раза. К числу наиболее распространенных методов упрочнения относится поверхностное пластическое деформирование (ППД) рабочих поверхностей элементов конструкций, которое благодаря созданию в поверхностных слоях остаточных сжимающих напряжений предотвращает возникновение циклических повреждений. Из указанных методов наиболее распространенным является пластическое деформирование специальным инструментом с круглообкаточными роликами (шариками), под воздействием нормальной силы и продольной подачи которого на обработанной поверхности создается оптимальная микроструктура и упрочненный слой. Совместное влияние указанных факторов, которое сравнительно мало изучено, в значительной степени меняет структуру несущей способности конструкций. При этом возможно как повышение усталостной прочности (упрочняющие технологии), так и ее значительное снижение в зависимости от концентрации напряжений, микрогеометрии поверхностей и влияния коррозии.

**Целью работы** является изучение усталостной прочности конструкций при комплексном воздействии факторов и составление номограмм для их графической оценки с применением программных средств.

**Постановка задачи и обоснование методики.** Для выполнения данного исследования применены следующие методы:

- *конструкционной механики* – для учета комплексного воздействия факторов усталостного процесса, представленных в виде относительных коэффициентов, представляющих отношения медианных пределов выносливости исходных и рассматриваемых факторов, которые получены при усталостных испытаниях стальных образцов [8-10]:

а) масштабного коэффициента:

$$K_{d\sigma} = \sigma_{Rd_{гЛ}} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \leq 1; \quad (1)$$

б) коэффициента концентрации напряжений:

$$K_{\sigma} = \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} / \sigma_{Rdк} > 1; \quad (2)$$

в) коэффициента микроповерхностного состояния:

$$K_{F\sigma} \sigma_{RFd} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \leq 1; \quad (3)$$

г) коэффициента упрочнения:

$$K_{v\sigma} = \sigma_{Rvd} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \geq 1; \quad (4)$$

д) суммарного коэффициента:

$$K_{\sigma D} = K_{\sigma} / (K_{d\sigma} \cdot K_{F\sigma} \cdot K_{v\sigma}); \quad (5)$$

- *математической статистики* – для определения регрессионных уравнений параметров взаимосвязанных факторов, полученных в результате усталостных испытаний, применяя стандартные программные средства;

- *системного анализа взаимодействия факторов* – для классификации, оформления систем регрессионных уравнений факторов и количественной оценки их взаимодействия;

- *номографическое представление систем уравнений* – для графического представления функциональных связей параметров с целью их определения и применения в уточненных расчетах на усталостную прочность элементов конструкций.

Идентичность структур коэффициентов (1) - (5) и их общая взаимосвязь в усталостном процессе позволяют представить их в виде многопараметрической функции

$$\Phi[(\Delta h, d, \bar{\alpha}_{\sigma}), (K_{d\sigma}, K_{\sigma}, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}})] = 0, \quad (6)$$

где  $\Delta h, d$  – толщина упрочненного поверхностного слоя и диаметр испытанного образца, мм;  $\bar{\alpha}_{\sigma}$  – медианное значение теоретического коэффициента концентрации напряжений. Функция (6) в расчетной практике представляется

в виде систем параметрических уравнений, в каждой из которых приоритетным является один из рассмотренных факторов, показатели которого действуют как аргументы данной системы, а показатели остальных – параметры уравнений. Из взаимодействующих факторов в [11] подробно рассмотрено влияние упрочняющей технологии, как приоритетное, на показатели сопротивления усталости элементов конструкции. В данной работе будет представлено аналогичное влияние концентрации напряжений как очередного значимого фактора. Система параметрических уравнений для данного случая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 K_{d\sigma} &= \psi_1(\bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = \alpha_\sigma, \\
 K_{d\sigma} &= \psi_2(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_\sigma, \\
 K_{v\sigma} &= \psi_3(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_\sigma, \\
 K_{v\sigma} &= \psi_4(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_{\sigma D}, \\
 \bar{\sigma}_{R(v)} &= \psi_5(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_{\sigma D}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Медианные пределы выносливости, представленные в (1) – (4), получены в результате проведения 16 серий усталостных испытаний образцов из стали 40Х при переменном сложном нагружении, по которым и рассчитаны указанные относительные коэффициенты. Совокупность данных  $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$ , согласно системе (7), статистически обработана [12-14], и получены регрессионные связи ( $R^2 > 0$ ) для параметрических уравнений (7).

**Результаты исследования.** В табл.1 представлены интервальные значения факторов  $\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h$  для оптимальных коэффициентов, а также изменения пределов выносливости  $\delta\bar{\sigma}_R = (K_{\sigma D} - 1)\%$  для диаметров испытанных образцов  $d = 7,5 \dots 20,0$  мм.

Эффект концентрации напряжений, как приоритетного фактора, имеет существенное влияние на сопротивление усталости элементов конструкций, и регулирование концентрации напряжений с применением упрочняющей технологии также имеет важное практическое значение. Из коэффициентов (1) – (5) по своей структуре особыми являются  $K_{v\sigma}$  и  $K_\sigma$ . Для испытанных образцов со средним уровнем концентрации напряжений ( $\bar{\alpha}_\sigma = 1,25 \dots 1,50$ ) исходный предел выносливости снижается примерно на 45...95%, а при воздействии ППД ( $\Delta h = 0,10 \dots 0,15$  мм) он восстанавливается и даже на 8...15% превышает исходное значение. На высоком уровне концентрации напряжений ( $\bar{\alpha}_\sigma = 2,75$ ) снижение  $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$  значительное, и оно предполагает обязательное применение ППД. Согласно экспериментальным данным, при  $\Delta h = 0,15$  мм это снижение уменьшается до 6...14%, а при  $\Delta h > 0,15$  мм возможно полное восстановление исходного значения  $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$ .

Таблица 1

Интервальные значения  $\bar{\alpha}_{\sigma i}$ ,  $\Delta h_i$ , мм,  $K_{\sigma}/K_{d\sigma}$ ,  $K_{v\sigma}$ ,  $K_{\sigma D}$  и  $\delta\bar{\sigma}_R$  при  $d = 7,5 \dots 20,0$  мм

№	$\bar{\alpha}_{\sigma i}$	$\Delta h_i$ мм	$K_{\sigma}/K_{d\sigma}$	$K_{v\sigma}$	$K_{\sigma D}$	$\delta\bar{\sigma}_{R(v)}$ , %
1	$\bar{\alpha}_{\sigma 1}$ , 1,00	0	1,00...1,25	1,00	1,00...1,23	0...+23
		0,05	1,00...0,86	1,01...1,07	0,99...1,08	-1...+8
		0,10	1,00...0,88	1,07...1,15	0,94...0,99	-6...-1
		0,15	1,00...0,90	1,15...1,27	0,87...0,90	-13...-10
2	$\bar{\alpha}_{\sigma 2}$ , 1,25	0	1,46...1,56	1,00	1,46...1,57	+46...+56
		0,05	1,25...1,18	1,19...1,30	1,05...0,91	+5...-9
		0,10	1,30...1,21	1,20...1,34	1,08...0,91	+8...-9
		0,15	1,34...1,32	1,25...1,37	1,07...0,96	+7...-4
3	$\bar{\alpha}_{\sigma 3}$ , 1,75	0	1,68...1,95	1,00	1,68...1,95	+68...+95
		0,05	1,35...1,30	1,26...1,42	1,07...0,91	+7...-9
		0,10	1,34...1,36	1,34...1,48	1,00...0,92	0...-8
		0,15	1,36...1,38	1,42...1,60	0,96...0,87	-4...-13
4	$\bar{\alpha}_{\sigma 4}$ , 2,75	0	2,56...3,00	1,00	2,56...3,00	+156...+200
		0,05	1,88...2,07	1,38...1,46	1,36...1,42	+36...+45
		0,10	1,86...2,01	1,47...1,59	1,27...1,26	+27...+26
		0,15	1,83...1,90	1,60...1,79	1,14...1,06	+14...+6

Логически последовательное рассмотрение значений коэффициентов (1) – (5) и  $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$ , которое следует из требований получения окончательного результата исследования, диктует необходимость представления взаимосвязанных параметрических уравнений (7) в I – IV квадрантах координатной системы  $(x, y)$  и построения соответствующей номограммы с целью ускоренного определения значений соответствующих коэффициентов графическим способом.

Основной задачей данной работы является количественная оценка приоритетных факторов (ППД, концентрация напряжений). Согласно данным усталостных испытаний, определены экспериментальные значения  $K_{d\sigma}$ ,  $K_{\sigma}$ ,  $K_{F\sigma}$ ,  $K_{v\sigma}$ ,  $K_{\sigma D}$ ,  $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$  при заданных уровнях  $\alpha_{\sigma}$  и  $\Delta h$ , которые по 4 шт. представлены в 16 подгруппах для каждого коэффициента, и по ним определены регрессионные уравнения ( $R^2 = 0,91 \dots 1,00$ ) функции  $K_{v\sigma} = (K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_{\sigma}, d, \Delta h)$  (табл.2).

По полученным регрессионным уравнениям, согласно (7), построена номограмма для приоритетной оценки концентрации напряжений ( $\bar{\alpha}_{\sigma}$ ). При этом применены принципы соответствия вида фактора и идентичности их масштабных параметров  $(x, y)$  (рис.) [15].

Метод номографии позволяет решить следующие задачи:

- согласно эксплуатационным режимам проектируемого изделия, выполнить оптимальные упрочняющие технологии к элементам конструкции;

- исходя из количества серийно выпускаемых конструкций, выполнить проектные процедуры для обеспечения новой сборочной технологии с целью увеличения их выпуска;

- назначить обоснованные сроки службы конструкций и технические показатели, обеспечивающие нормальные условия их работы;

- учитывая противоположные требования к проектируемой конструкции (высокая рабочая скорость и производительность, низкое энергопотребление и материалоемкость, автоматизация рабочих процессов и др.), создать конструкцию, которая обеспечит высокую надежность и безопасную эксплуатацию, будет иметь обоснованные сроки службы и ремонтных работ.

Таблица 2

Уравнения регрессии функции  $K_{v\sigma} = \psi_4(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h)$

№	$\Delta h, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$K_{v\sigma} = \psi_4(K_{\sigma D})$	$R^2$
1	0,0	7,5	$K_{v\sigma} = 1,0$	1,0
2		10	$K_{v\sigma} = 1,0$	
3		15	$K_{v\sigma} = 1,0$	
4		20	$K_{v\sigma} = 1,0$	
5	0,05	7,5	$K_{v\sigma} = -0,475x^2 + 1,841x - 0,315$	0,978
6		10	$K_{v\sigma} = -0,734x^2 + 2,839x - 0,951$	0,989
7		15	$K_{v\sigma} = -1,170x^2 + 3,942x - 1,628$	0,995
8		20	$K_{v\sigma} = -1,229x^2 + 4,130x - 2,743$	0,929
9	0,10	7,5	$K_{v\sigma} = -0,371x^2 + 1,740x - 0,124$	0,934
10		10	$K_{v\sigma} = -0,743x^2 + 2,817x - 0,527$	0,963
11		15	$K_{v\sigma} = -0,847x^2 + 4,072x - 1,187$	0,983
12		20	$K_{v\sigma} = -1,342x^2 + 4,580x - 1,437$	0,941
13	0,15	7,5	$K_{v\sigma} = -0,045x^2 + 0,327x + 0,504$	0,921
14		10	$K_{v\sigma} = -0,297x^2 + 1,628x + 0,176$	0,932
15		15	$K_{v\sigma} = -0,511x^2 + 2,375x - 0,256$	0,937
16		20	$K_{v\sigma} = -0,127x^2 + 1,214x + 0,358$	0,910

В отличие от классической методологии проектирования конструкций, которая основана на дифференциальной оценке влияющих факторов, номографический метод позволяет с различным числом и сочетаниями разнохарактерных факторов комплексно оценить воздействие и выбрать оптимальные интервалы их параметров в кратчайшие сроки проектирования без выполнения сложных расчетных процедур.

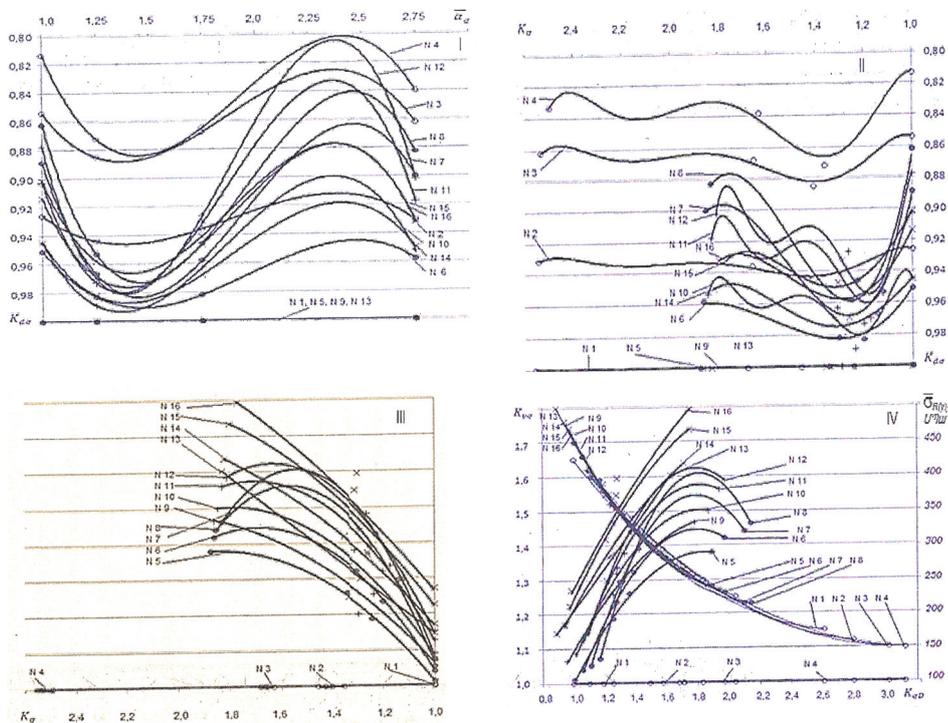


Рис. Номограмма системы уравнений (7) и функции  $\bar{\sigma}_{R(v)} = \psi_5(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h)$ .  
 Обозначения: o, ●, +, x -  $\Delta h = 0, 0,05, 0,10, 0,15$  мм; кривые №№1, ..., 16  
 соответствуют каждому уравнению системы (7)

**Выводы.** Для оптимальной оценки влияния факторов составлена сводная математическая модель эффекта концентрации напряжений в виде многопараметрической функциональной связи, которая для практических целей заменена частной системой параметрических уравнений. Получены регрессионные уравнения указанной системы, которые позволяют определить взаимосвязанные оптимальные значения всего комплекса параметров без выполнения дополнительных испытаний.

Для изучения влияния концентрации напряжений выполнено комплексное исследование для разных типов конструкций, конструкционного материала (сталь 40X) и ППД (обкатка роликовым деформирующим инструментом). Показано, что выявленные функциональные связи, которые являются частными математическими моделями, подтверждают улучшение состояния поверхностных слоев и повышение прочности элементов. ППД эффективно компенсирует совместное влияние масштабного эффекта и концентрации напряжений, приближая  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  к исходным значениям гладких образцов. Анализ влияния концентрации напряжений на  $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}$  и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  при различных сочетаниях

доминантности параметров  $\Delta h$ ,  $d$  и  $\bar{\alpha}_\sigma$ , выдвигаемой требованиями расчетно-технологических и эксплуатационных процедур проектируемой конструкции, показал возможность применения в расчетах ранее неучтенного комплексного воздействия коэффициентов и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ .

Получена сводная номограмма, с применением которой решаются задачи выбора оптимальных параметров концентрации напряжений, уточняются характеристики работоспособности конструкций, достигаются низкие материалоемкость и себестоимость конструкций, которые в заданном сроке службы обеспечат их надежную и безопасную работу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин.- М.: Изд-во МГПУ, 2002. -560с.
2. **Дашенко А.Ф., Кравчук В.С., Иоргачев В.Д.** Несущая способность упрочнения деталей машин.- Одесса: Астропринт, 2004. -160с.
3. Технологические методы обеспечения надежности машин / **И.М. Жарский и др.**- Минск: Высш. шк., 2010. -336с.
4. **Թորոսյան Մ.Ս., Ստակյան Մ.Գ.** Լարումների կոտակման ադդեցությունը ամրացված մեքենամասերի հոգնածային դիմադրության բնութագրիչների վրա// ՃՇՀԱՀ Տեղեկագիր.- 2017.- 55, №2. - էջ12-19:
5. **Барац Я.И., Милованова Л.Р.** Обработка поверхностей отверстий методом поверхностно-пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа // Металлообработка.- 2006. -№3. - С.28-34.
6. **Когаев В.П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.- М.: Машиностроение, 2003. – 232 с.
7. **Левин В.А., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г.** Избранные нелинейные задачи механики разрушения.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 408 с.
8. **Матвиенко Ю.Г.** Диаграммы трещиностойкости тел с надрезами и трещинами// Проблемы машиностроения и надежности машин.-2004. -№3, - С.53-57.
9. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра / **В.Ф. Павлов и др.** // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IV Всеросс. конф. с Междунар. уч., Ч.2, -Самара. 2007. - С.171-174.
10. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в цилиндрических образцах с концентраторами напряжений / **М.Н. Саушкин и др.** //Мат. мод. физ., эконом., техн., соц. систем и процессов: Тр. VII Межд. конф. – Ульяновск 2009. - С. 244-245.
11. **ASTM E 1820-99a.** Standart Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2001.
12. **Ստակյան Մ.Գ.** Գիտափորձի արդյունքների վիճակագրական մշակման մեթոդները. -Երևան: ՀՊՃՀ, 2003. - 99էջ:
13. **Гуров Р.В.** Разработка программы для моделирования отделочной и отделочно-упрочняющей обработки ППД//Изв. Тульск. гос. ун-та. Сер. Техн. науки.- Тула. - 2011. -№6/2. - С.127-132.

14. **Кирпичев В.А., Саушкин М.Н., Смыслов В.А.** К математическому моделированию полей пластических деформаций, возникающих при различных видах упорочняющей обработки//Мат. мод. физ., эконом., техн., соц. систем и процессов: Тр. XVII Межд. конф., - Ульяновск.- 2009. - С.116-117.
15. **Хованский Г.С.** Основы номографии.-М.: Наука, 1986. -325 с.

Национальный университет архитектуры и строительства Армении. Материал поступил в редакцию 26.11.2025.

**Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ն.Վ. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ, Ա.ՅՈՒ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ**

**ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ  
ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ  
ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ**

Դիտարկված է շինարարական կոնստրուկցիաների հոգնածային դիմադրության վրա մի շարք հիմնական գործոնների (բեռնվածության ռեժիմ, նյութագիտական, մասշտաբային, մակերևութային միկրոանհարթությունների, ամրացման և գումարային գործընթացների) համալիր ներգործման պայմաններում լարումների կուտակման ազդեցությունը որպես առաջնային գործոնի, որը գնահատվում է համապատասխան հարաբերական գործակիցներով և էլքային դիմացկունության սահմանով: Ներկայացված է տվյալ փոխազդեցությունը գնահատող բազմապարամետրական ֆունկցիոնալ կապ: Կառուցված է նոմոգրամ գործակիցների, դիմացկունության սահմանների օպտիմալ արժեքները ստանալու և դրանք հաշվարկային գործընթացներում կիրառելու համար:

**Առանցքային բառեր.** շինարարական կոնստրուկցիա, հոգնածային դիմադրություն, ազդող գործոն, լարումների կուտակում, նոմոգրամ:

**M.G. STAKYAN, N.V. PIRUMYAN, A.YU. SAFARYAN**

**ASSESSMENT OF FATIGUE RESISTANCE OF BUILDING STRUCTURE  
ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT STRESS CONCENTRATIONS**

The influence of stress concentration is considered as a priority under the conditions of the complex impact of a number of crucial factors (loading mode, material, scale, surface micro-irregularities, strengthening and the total process) on fatigue resistance of building structures, which is estimated by the corresponding relative coefficients and the initial endurance limit. To assess this relationship, a multi parametric functional relationship is presented. The nomogram is created for calculating optimal parameters, relative coefficients and their application in calculation procedures.

**Keywords:** building structure, fatigue resistance, acting factor, stress concentration, nomogram.

**ՀԱԶՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ  
ՎԱԶԳԵՆ ՄԵԼԻՔՅԱՆԻ 70-ԱՄՅԱԿԻ ԱՌԹԻՎ**



Լրացավ ՀԱՊՀ-ի «Միկրոէլեկտրոնային սխեմաներ և համակարգեր» (ՄՍ և Հ) ամբիոնի վարիչ, «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ ուսումնական դեպարտամենտի տնօրեն, ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ, ՀՀ գիտության վաստակավոր գործիչ, ՀՀ նախագահի և ՀՀ ԳԱԱ մրցանակների դափնեկիր, տ.գ.դ., պրոֆեսոր Վազգեն Շավարշի Մելիքյանի ծննդյան 70- ամյակը:

Վազգեն Մելիքյանը 1978թ. ավարտել է Երևանի պոլիտեխնիկական ինստիտուտի «Տեխնիկական կիրառական» ֆակուլտետը: 1984թ.

Մոսկվայի ինժեներաֆիզիկական ինստիտուտում ստացել է տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճան, մեկ տարի անց՝ դոցենտի գիտական կոչում, 2006թ.՝ տեխնիկական գիտությունների դոկտորի գիտական աստիճան և նույն տարում՝ պրոֆեսորի գիտական կոչում: 2010թ. ընտրվել է ՀՀ ճարտարագիտական ակադեմիայի ակադեմիկոս, 2012թ.՝ Ռուսաստանի, Ուկրաինայի և Բելառուսի կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի գիտությունների ակադեմիայի ակադեմիկոս, 2014թ.՝ Միջազգային ճարտարագիտական ակադեմիայի ակադեմիկոս:

2014թ. ընտրվել է ՀՀ Գիտությունների ազգային ակադեմիայի թղթակից անդամ:

Բազմաբեղուն է Վ. Մելիքյանի գիտական և ուսումնակրթական գործունեությունը: Նա 13 մենագրությունների (որից երեքը՝ հրատարակված Springer-ում), 350-ից ավելի գիտական և 140-ից ավելի մեթոդական աշխատանքների հեղինակ է, միջազգային գիտաժողովներում ներկայացրել է 200-ից ավելի զեկուցումներ:

Վ. Մելիքյանի գիտական հետազոտությունների շրջանակն ընդգրկում է՝ ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) համակարգային մակարդակի նախագծումը և համանախագծումը, մտավոր սեփականության և հենքահեն նախագծումը, բյուրեղի վրա ցանցերի նախագծման մեթոդաբանությունը, ԻՍ-երի ֆունկցիոնալ, միջոց-գիստրային փոխանցումների և փականային մակարդակների մոդելավորումն ու ստուգումը, էլեկտրոնային սխեմաների էլեկտրական, տրամաբանական, խառը սխեմատեխնիկական և ժամանակային մոդելավորումը, ԻՍ-երի թեստավորումը, ԻՍ-երի միջմիացումների մոդելավորումը և քաղվածքը, սպառվող հզորության վերլուծությունը և ցածր հզորությամբ ԻՍ-երի նախագծումը, արագագործ ԻՍ-երի

նախագծումը, տրամաբանական նախագծումը և սխեմաների օպտիմալացումը, ազդանշանների ամբողջականության և նախագծերի հուսալիության վերլուծությունը, կիսահաղորդչային սարքերի մոդելավորումը, ֆիզիկական նախագծումը և արտադրությանը կողմնորոշված նախագծումը:

Վ.Մելիքյանը միջազգային տարբեր գիտաժողովներում բազմիցս արժանացել է «Լավագույն հոդված» մրցանակի: Նրա գիտական աշխատանքները տպագրվում են բարձր վարկանիշ ունեցող միջազգային ամսագրերում, զեկուցվում են միջազգային գիտաժողովների պլենար նիստերում: Հաջողությամբ ղեկավարում է բազմաթիվ միջազգային և հանրապետական գիտական և կրթական նախագծեր: Հանդիսանում է ՀՀ ԿԳՆ անցկացրած գիտաշխատողների՝ «Բարձր արդյունավետությամբ աշխատող» բոլոր մրցույթների հաղթող:

Վ. Մելիքյանի ղեկավարությամբ 90 ասպիրանտներ հաջողությամբ պաշտպանել են թեկնածուական ատենախոսություններ: Ղեկավարել է նաև 200-ից ավելի մագիստրոսական թեզեր և շուրջ 350 դիպլոմային ու ավարտական աշխատանքներ:

Վազգեն Մելիքյանը ՀԱՊՀ «Միկրոէլեկտրոնային սխեմաներ և համակարգեր» ամբիոնի վարիչն է նրա հիմնադրման օրվանից՝ 2001թ. -ից, միաժամանակ հանդիսանում է «Մինոփսիս Արմենիա» ընկերության ուսումնական դեպարտամենտի տնօրենը, ՀԱՊՀ-ի և Էլեկտրոնային ավտոմատացված նախագծման բնագավառի համաշխարհային առաջատար «Մինոփսիս» ընկերության հետ համատեղ կատարվող Էլեկտրոնային ավտոմատացված նախագծման բնագավառի համաշխարհային առաջատար «Բուհ - Արտադրություն» կրթական մոդելի հիմնական իրագործողը: Նրա կողմից ստեղծված ուսումնական նյութերը և ռեսուրսները լայնորեն կիրառվում են բազմաթիվ երկրների 2000-ից ավելի առաջատար բուհերի (Մասաչուսեթսի տեխնոլոգիական, Ստենֆորդի, Բերկլիի, Քեմբրիջի, Օքսֆորդի համալսարաններ և այլն) ուսումնական գործընթացում և համաշխարհային նշանակության ընկերությունների (Ինթել, ԱյԷմԴի, Քուալքոմ, Էփլ, Սամսոնգ, Անալոգ Դիվայսիս և այլն) ուսումնական կենտրոններում: Վ.Շ. Մելիքյանը հաճախ հրավիրվում է արտերկրի բազմաթիվ հայտնի համալսարաններ՝ դասախոսություններ կարդալու:

2004թ. դեկտեմբերի 1-ին «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ-ի և ՀՊՃՀ-ի միջև կնքված համագործակցության համաձայնագրով ՄՍ և Հ ամբիոնը դարձավ «Մինոփսիսի» համաշխարհային համալսարանական ծրագրի անդամ և օգտվում է ընկերության կողմից բարձրորակ կրթությամբ ուսանողների պատրաստմանը նպատակաուղղված համաշխարհային համալսարանական ծրագրերի խողովակով կրթական և հետազոտական 1900 հաստատություններին տրամադրվող գործիքային միջոցներից ու տեխնոլոգիաներից:

Ամբիոնն իրականացնում է բակալավրական, մագիստրոսական և ասպիրանտական կրթական ծրագրեր: Ուսանողների ընտրությունը կատարվում է «Մինոփսիս» ընկերության փորձառու մասնագետների և համալսարանի առաջատար դասախոսների կողմից: Բակալավրական ծրագրի հիմնական կրթական փուլից՝ 2-րդ կուրսից հետո ուսանողները մրցույթով անցնելով կարող են շարունակել իրենց ուսուցումը համատեղ կրթական այս ծրագրով:

Բակալավրական, մագիստրոսական և ասպիրանտական ծրագրերն իրականացվում են ՄԱՈԻԴ-ի կողմից մշակված «Ինտեգրալ սխեմաների նախագծում և էլեկտրոնային նախագծման ավտոմատացում» ուսումնական ծրագրերով: Այս համապարփակ ուսումնական ծրագրերը կազմվել են SS և կիսահաղորդչային արդյունաբերության ոլորտների առաջատար ընկերությունների ներկայիս պահանջների հաշվառմամբ և ոլորտի լավագույն փորձագետների և դասախոսների ներգրավմամբ:

Դասերն անցկացվում են հատուկ սարքավորումներով հագեցած լսարաններում, որտեղ յուրաքանչյուր ուսանող ունի հնարավորություն՝ օգտվելու «Մինոփսիս» ընկերության կողմից նվիրաբերված նորագույն ԷՆԱ ծրագրային գործիքային միջոցներից և ստեղծելու բազմապիսի ուսումնական նախագծեր: Դասավանդումը, ինչպես և կուրսային նախագծերի, ավարտական աշխատանքների, մագիստրոսական թեզերի և թեկնածուական ատենախոսությունների ղեկավարումներն ուղղորդված են «Մինոփսիս Արմենիայում» կատարվող արդյունաբերական նշանակությամբ նախագծերին, որոնք իրականացվում են «Մինոփսիսի» առաջատար փորձագետների և համալսարանների փորձառու դասախոսների կողմից: Ըստ համալսարան-արդյունաբերություն կրթական մոդելի՝ ինչպես ՀԱՊՀ որակյալ դասախոսները, այնպես էլ «Մինոփսիս» ընկերության լավագույն մասնագետները մրցութային եղանակով հրավիրվում են դասավանդելու ամբիոնում: Կրթողների այսպիսի լայն բազմազանությամբ ապահովվում է տեսական գիտելիքների և առաջավոր ճարտարագիտական փորձի համատեղումն ամբիոնում:

ՀԱՊՀ-ում արդեն 23 տարի հաջողությամբ կիրառված «Մինոփսիսի» կրթական մոդելը՝ Արդյունաբերություն/Բուհ սերտ համագործակցությամբ, ապահովում է մասնագետների պատրաստման գործընթացի՝ արդյունաբերության պահանջներին առավելագույնս մոտ լինելու հնարավորություն: «Մինոփսիս» ընկերության լուծումների օգտագործումն ուսանողներին դեռևս ուսումնառության ընթացքում ընձեռում է աշխատաշուկային անհրաժեշտ գիտելիքների յուրացման հնարավորություն, իսկ շրջանավարտները ձեռք են բերում բարձր որակավորում և տիրապետում են անհրաժեշտ հմտությունների՝ ինչպես «Մինոփսիս Արմենիայում», այնպես էլ SS ոլորտի այլ առաջատար ընկերություններում աշխատելու համար:

ՀԱՊՀ-Մինոփսիս համատեղ գործող ամբիոնն իր ծրագրի իրագործման 25 տարիների ընթացքում հասել է ակնառու հաջողությունների. 90 ասպիրանտներ հաջողությամբ պաշտպանել են ատենախոսությունները՝ ստանալով գիտությունների թեկնածուի որակավորում: Մինչ օրս ամբիոնը թողարկել է 1500 շրջանավարտ, որոնց 100%-ն աշխատում է մասնագիտական ոլորտում, այդ թվում՝ շուրջ 70%-ը «Մինոփսիսում», մնացածը՝ տեղական ՏՏ ոլորտի այլ ընկերություններում:

Նշանակալից է Վ. Մելիքյանի գործունեությունը նաև կրթական-հասարակական ասպարեզում. 2007թ. -ից հանդիսանում է ՀԱՊՀ Գիտական խորհրդի անդամ, 2020թ. -ից՝ ՀԱՊՀ Հոգաբարձուների խորհրդի անդամ, 2021թ. -ից՝ ՀՀ ԳԱԱ նախագահության անդամ, 2021թ. -ից՝ IEEE ավագ անդամ: Մի շարք բուհերի, այդ թվում՝ նաև Քսիյանի համալսարանի (Չինաստան), Մոսկվայի էլեկտրոնային տեխնիկայի ինստիտուտի (Ռուսաստան), Եվրոպական կրթական տարածաշրջանային ակադեմիայի պատվավոր պրոֆեսոր է, բազմաթիվ միջազգային հեղինակավոր գիտական պարբերականների խմբագրական կոլեգիաների անդամ և գլխավոր խմբագիր, միջազգային գիտաժողովների ծրագրային հանձնաժողովների նախագահ, անդամ կամ բաժանմունքի ղեկավար, ատենախոսությունների պաշտպանությունների մասնագիտական խորհուրդների նախագահ և անդամ, Միկրոէլեկտրոնիկայի հայաստանյան ամենամյա միջազգային օլիմպիադայի ծրագրային կոմիտեի նախագահ, ՏՏ ոլորտում Հայաստանի Հանրապետության Նախագահի մրցանակաբաշխության հանձնաժողովի անդամ, գիտության և տեխնոլոգիայի ոլորտում ՀՀ նախագահի մրցանակի հանձնաժողովի նախագահ, ՏՏ բնագավառում լավագույն ուսանողներին և աշակերտներին շնորհվող կրթական պարգևների մրցանակաբաշխության հանձնաժողովի պատասխանատու քարտուղար:

Նրա վաստակը նշանավորված է բազմաթիվ պետական պարգևներով և գերատեսչական մեդալներով. ՀՀ վարչապետի «Հուշամեդալ» Գիտության և կրթության զարգացման գործում ներդրած ավանդի համար, Հայաստանի Հանրապետության կրթության և գիտության նախարարության բարձրագույն պարգև՝ «Ոսկե մեդալ» Կրթության և գիտության ոլորտում ներդրած մեծագույն ավանդի համար, ՀՀ պաշտպանության նախարարության «Վազգեն Սարգսյան», «Գարեգին Նժդեհ» և «ՀՀ զինված ուժերի 20 տարի» մեդալներ, ՀԱՊՀ «Ոսկե մեդալ», Երևանի պետական համալսարանի «Ոսկե մեդալ», Ռուս-հայկական (Սլավոնական) համալսարանի «Ոսկե մեդալ», Եվրոպական համալսարանի «Ոսկե մեդալ», «ՎիվաՄել» ընկերության «Ոսկե մեդալ» և այլն:

Վ. Մելիքյանին 2006թ. ՀՀ Նախագահի հրամանագրով շնորհվել է ՀՀ Գիտության վաստակավոր գործչի կոչում:

Վազգեն Մելիքյանը ավագ ընկեր ու խորհրդատու է իր ասպիրանտների համար, սրտացավ և հոգատար է ամբիոնում ուսումնառող յուրաքանչյուր

ուսանողի նկատմամբ, իր գործին անսահման նվիրվածությամբ և հանրապետական ու միջազգային գիտակրթական ասպարեզներում իր համակողմանի գործունեությամբ բարձր է պահում ՀԱՊՀ հեղինակությունը, վայելում է պոլիտեխնիկական համայնքի սերն ու հարգանքը:

ՀԱՊՀ ռեկտորատը, պրոֆեսորադասախոսական կազմը, ուսանողական խորհուրդը հոբելյանի առթիվ շնորհավորում են Վազգեն Մելիքյանին, մաղթում նրան ամենայն բարիք, նորանոր նվաճումներ հայրենական ու միջազգային գիտության և ուսումնակրթական ասպարեզներում:

**ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ**

**ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՄԱՀԱԿՅԱՆ Ն.Գ., ՍԱՍՈՒՆՅՅԱՆ Մ.Է.**  
 MAX-ՖԱԶԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ  
 ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ..... 5

**ԴԱՎԻԹՅԱՆ Կ.Հ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա., ԴԱՎԻԴՅԱՆ Ա.Կ.,  
 ՊԱՄԿԵՎԻԶՅԱՆ Տ.Գ., ՀԱԿՈՔՅԱՆ Ա.Ո.**  
 ՍՏԱՆԴԱՐՏ ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻՑ ԿԱԼՑԻՈՒՄԻ ՍՈԼԻԲԴԱՏԻ  
 ՍՏԱՅՈՒՄԸ..... 19

**ՄԱԻԼՅԱՆ Լ.Ս.**  
 ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՓՈՔԲ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԶԱՌԻԹԱՓ ՀԱՆՔԱՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ  
 ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՄՇԱԿՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ,  
 ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՄԱՆ ԵՎ ՆՈՐԵՐԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ  
 ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ..... 26

**ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Զ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ռ.Ա.**  
 ՀՈՎԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՐԴՅՈՒՆՎԵՏՈՒԹՅԱՆ  
 ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ («ՀՐԱԶԴԱՆ-5» ԶԷԿ-Ի ՕՐԻՆԱԿՈՎ)..... 39

**ԹԱՂԵՎՈՍՅԱՆ Ա.Վ., ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Վ.Զ., ԱԿԱՐՄԱԶՅԱՆ Ա.Ս.**  
 ՄԵՎԱՆԱ ԼԻՃ ԹԱՓՎՈՂ ԳԵՏԵՐԻ ԶՐԵՐԻ ՄԱՔՐՈՒՄԸ..... 49

**ԴԱՎԹՅԱՆ Ն.ՅՈՒ.**  
 ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՂՏՈՏՎԱԾՈՒԹՅԱՆ  
 ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ..... 54

**ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ա.Ս., ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ Ն.Հ.**  
 ՌՕԴ-54/2.6 ՌԱԴԻՈՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԴԻՏԱԿԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՄԵԾ ՀԱՅԵԼՈՒ  
 ԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԴԻՐՔԱՅԻՆ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ  
 ՆԱԽԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼԱՐՄԱՆ ՓՈՒԼԻ ՀԱՄԱՐ..... 64

**ՄԻՆԱՍՅԱՆ Հ.Դ.**  
 ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐՈՎ ՍԱՀՄԱՆԱՓԱԿՎԱԾ IOT ՄԱՐՔԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ  
 ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ԱՊԱՐԱՏԱՅԻՆ ԳԱՂՏՆԱԳՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ  
 ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՔԱՆԱԿԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ..... 79

**ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Շ.**  
 ԳՐԱՔՆՆՈՒԹՅԱՆԸ ԴԻՄԱԿԱՅՈՒՄ WEB3 ՄՈՒՏՔԻ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ. ԱՆԿԱԽ  
 ՄԱՏՈՒՑՄԱՆ ԴԱՐՊԱՄՆԵՐ. ՀԱՅԱՅՔ ՃԱՐՏԱՐԱԳԵՏԻ ՏԵՄԱՆԿՅՈՒՆԻՑ  
 ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Դ.Կ.  
 ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՄԲ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ  
 ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ՄԵԹՈՂ..... 94

**ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Գ.Ա.**  
 ՏԱՐԱԲՆՈՒՅԹ ՊՐՈՑԵՍՈՐԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԱՄԱՏԵՂ  
 ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԱՊԱՀՈՎՄԱՆ ՄԵԹՈՂ..... 102

<b>ԳԱՄՊԱՐՑԱՆ Օ.Ն., ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Լ.Ս., ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Գ.Ա., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Հ.</b>	
ՄՏՅՈՒԱՐՏԻ ՀԱՐԹԱԿԻ ՌՈԲԱՍՏ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԱԴԻՏԻՎ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ .....	108
<b>ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Գ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ռ.Ն.</b>	
ԿՄԱԽՔԱՅԻՆ ԳՐԱՖԻ ԿԱՌՈՒՑՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ԽՈՇՈՐԱՀԱՏԻԿ ԶՈՒԳԱՀԵՌԱՅՈՒՄԸ .....	121
<b>ԱԲԳԱՐՅԱՆ Հ.Ս.</b>	
ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒԶԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՅՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԻՐԱԿԱՆԱՅՈՒՄԸ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ (II).....	130
<b>ՍՏԱԿՅԱՆ Մ.Գ., ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ Ն.Վ., ՍԱՖԱՐՅԱՆ Ա.ՅՈՒ.</b>	
ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ.....	137
<b>ՀԱԶՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ ՎԱԶԳԵՆ ՄԵԼԻՔՅԱՆԻ 70-ԱՄՅԱԿԻ ԱՌԹԻՎ .....</b>	146

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АГБАЛЯН С.Г., СААКЯН Н.Г., САСУНЦЯН М.Е.</b> АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ МАХ-ФАЗ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ .....	5
<b>ДАВИТЯН К.Г., АРУТЮНЯН С.А., ДАВИДЯН А.К., ПАСКЕВИЧЯН Т.Г., АКОПЯН А.Р.</b> ПОЛУЧЕНИЕ МОЛИБДАТА КАЛЫЦИЯ ИЗ СТАНДАРТНЫХ МОЛИБДЕНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ .....	19
<b>МАИЛЯН Л.С.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ И СОЗДАНИЮ НОВЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ В АРМЕНИИ.....	26
<b>МАРУХЯН В.З., ВАРДАНЯН Р.А.</b> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТЭС «РАЗДАН-5»).....	39
<b>ТАДЕВОСЯН А.В., МАРУХЯН В.З., АКАРМАЗЯН А.С.</b> ОЧИСТКА РЕЧНЫХ ВОД ВПАДАЮЩИХ В ОЗЕРО СЕВАН.....	49
<b>ДАВТЯН Н.Ю.</b> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ .....	54
<b>САРГСЯН А.С., АМБАРЦУМЯН Н.А.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БОЛЬШОГО ЗЕРКАЛА АНТЕННЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭТАПА ЮСТИРОВКИ ROT-54/2.6 .....	64
<b>МИНАСЯН А.Д.</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ АППАРАТНЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕСУРСНО-ОГРАНИЧЕННЫХ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ .....	79
<b>АРУТЮНЯН А.Ш.</b> УСТОЙЧИВОСТЬ К ЦЕНЗУРЕ В СЛОЯХ ДОСТУПА WEB3: ИНЖЕНЕРСКИЙ ВЗГЛЯД НА НЕЗАВИСИМЫЕ ШЛЮЗЫ ОТОБРАЖЕНИЙ.....	87
<b>МАРУХЯН Д.К.</b> МЕТОД ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА .....	94
<b>АРУТЮНЯН Г.А.</b> МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РАЗНОТИПНЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ .....	102
<b>ГАСПАРЯН О.Н., БУНИАТЯН Л.М., МЕЛКОНЯН Г.А., ГРИГОРЯН А.Г.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАТФОРМЫ СТЮАРТА ПРИ АДДИТИВНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯХ .....	108
<b>АРУТЮНЯН А.Г., ХАЧАТРЯН Р.Н.</b> КРУПНОЗЕРНИСТАЯ ПАРАЛЛЕЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ КАРКАСНОГО ГРАФА .....	121

<b>АБГАРЯН О.С.</b> ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРА- МЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА-ПЕНРОУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ (II) .....	130
<b>СТАКЯН М.Г., ПИРУМЯН Н.В., САФАРЯН А.Ю.</b> ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ .....	137
<b>НА ПУТИ К УСПЕХУ. К 70 – ЛЕТИЮ ВАЗГЕНА МЕЛИКЯНА .....</b>	<b>146</b>

## CONTENTS

<b>AGHBALYAN S.G., SAHAKYAN N.G., SASUNTSYAN M.E.</b> ANALYSIS OF METHODS FOR OBTAINING MAX-PHASES AND DEVELOPING AN OPTIMAL TECHNOLOGICAL SCHEME .....	5
<b>DAVITYAN K.G., HARUTYUNYAN S.A., DAVIDYAN A.K., PASKEVICHYAN T.G., HAKOBYAN A.R.</b> OBTAINING CALCIUM MOLYBDATE FROM STANDARD MOLYBDENUM CONCENTRATES .....	19
<b>MAILYAN L.S.</b> RESULTS OF WORK ON SELECTING OPTIMAL SYSTEMS, IMPROVING AND CREATING NEW SYSTEMS FOR UNDERGROUND MINING OF LOW-POWER STEEP-DIP ORE BODIES IN ARMENIA .....	26
<b>MARUKHYAN V.Z., VARDANYAN R.A.</b> ASSESSING THE EFFICIENCY OF A COMBINED COOLING SYSTEM (ON THE EXAMPLE OF THE «HRAZDAN-5» TPP) .....	39
<b>TADEVOSYAN A.V., MARUKHYAN V.Z., AKARMAZYAN A.S.</b> CLEANING RIVER WATERS FALLING INTO LAKE SEVAN .....	49
<b>DAVTYAN N.YU.</b> ASSESSING THE IMPACT OF FOULING ON SURFACE CONDENSERS.....	54
<b>SARGSYAN A.S., HAMBARDZUMYAN N.H.</b> MODELING THE PROCESS OF PANEL POSITION DEVIATIONS MEASUREMENT ON THE SURFACE OF THE SPHERICAL REFLECTOR OF THE ROT-54/2.6 ANTENNA FOR THE PRELIMINARY STAGE OF ITS ALIGNMENT .....	64
<b>MINASYAN H.D.</b> MATHEMATICAL MODELING AND QUANTITATIVE SECURITY ASSESSMENT OF HARDWARE-BASED CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS FOR RESOURCE- CONSTRAINED IOT DEVICES .....	79
<b>HARUTYUNYAN A.SH.</b> SENSORSHIP RESISTANCE IN WEB3 ACCESS LAYERS: AN ENGINEERING PERSPECTIVE ON INDEPENDENT RENDERING GATEWAYS .....	87
<b>MARUKHYAN D.K.</b> THE PHYSICAL DESIGN METHOD FOR INTEGRATED CIRCUITS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE .....	94
<b>HARUTYUNYAN G.A.</b> A METHOD FOR ENSURING THE JOINT OPERATION OF HETEROGENEOUS PROCESSOR INTEGRATED CIRCUITS.....	102
<b>GASPARYAN O.N., BUNIATYAN L.M., MELKONYAN G.A., GRIGORYAN A.H.</b> INVESTIGATING THE ROBUST STABILITY OF THE STEWART PLATFORM UNDER ADDITIVE UNCERTAINTIES .....	108
<b>HARUTYUNYAN A.G., KHACHATRYAN R.N.</b> COARSE-GRAINED PARALLELIZATION OF THE SPANNING GRAPH CONSTRUCTION ALGORITHM.....	121

<b>ABGARYAN H.S.</b>	
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINING COMPLEX ONE- PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE MATRICES USING DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS (II) .....	130
<b>STAKYAN M.G., PIRUMYAN N.V., SAFARYAN A.YU.</b>	
ASSESSING THE FATIGUE RESISTANCE OF BUILDING STRUCTURE ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT STRESS CONCENTRATIONS.....	137
<b>ON THE WAY TO SUCCESS. TO THE 70<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF VAZGEN MELIKYAN .....</b>	<b>146</b>

## ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- 1 Արգարյան Հովհաննես Սամվելի «Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ և ավտոմատացում» ամբիոնի դասախոս, ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [abgaryanhov@gmail.com](mailto:abgaryanhov@gmail.com)
- 2 Ակարմազյան Հայկ Սահակի տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [h.akarmazyan@polytechnic.am](mailto:h.akarmazyan@polytechnic.am)
- 3 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [metalsur@polytechnic.am](mailto:metalsur@polytechnic.am)
- 4 Բունիաթյան Լիանա Մերուժանի Կառավարման համակարգերի ամբիոնի վարիչի պաշտոնակատար, տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [liana.buniatyan@polytechnic.am](mailto:liana.buniatyan@polytechnic.am)
- 5 Գասպարյան Օլեգ Նիկոլայի Կառավարման համակարգերի ամբիոն, պրոֆեսոր, տ.գ.դ., ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [ogasparyan@gmail.com](mailto:ogasparyan@gmail.com)
- 6 Գրիգորյան Ալեն Համլետի Ուս. խորհրդի նախագահ, Կառավարման համակարգերի ամբիոն, մագիստրանտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [alen.grigoryan@polytechnic.am](mailto:alen.grigoryan@polytechnic.am)
- 7 Դավթյան Նվարդ Յուրիկի ՋԷ և ՇՄՊ ամբիոնի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [davtyannvard8@gmail.com](mailto:davtyannvard8@gmail.com)
- 8 Դավիդյան Արթուր Կարենի ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, գիտաշխատող,  
**Էլ. հասցե** - [artur.davidyan21@gmail.com](mailto:artur.davidyan21@gmail.com)
- 9 Դավիթյան Կարեն Հենրիկի ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, լաբորատորիայի վարիչ, տ.գ.դ.  
**Էլ. հասցե** - [sdmanager2012@gmail.com](mailto:sdmanager2012@gmail.com)
- 10 Թադևոսյան Արտաշես Վահանի տ.գ.թ., պրոֆ., ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [tadartashes@gmail.com](mailto:tadartashes@gmail.com)
- 11 Խաչատրյան Ռաֆայել Նորայրի «ՄՍ և Հ» ամբիոնի ասպիրանտ, Ավագ ծրագրային ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [raf.khachatryan4@gmail.com](mailto:raf.khachatryan4@gmail.com)
- 12 Հակոբյան Ասյա Ռաֆայելի ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, գիտաշխատող,  
**Էլ. հասցե** - [assia77@yandex.ru](mailto:assia77@yandex.ru)
- 13 Համբարձումյան Նարեկ Հակոբի ՏՀՏԷ ինստիտուտի Ռադիոսարքեր և կապի համակարգեր ամբիոնի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [n.hambardzumyan@polytechnic.am](mailto:n.hambardzumyan@polytechnic.am)
- 14 Հարությունյան Աշոտ Գևորգի «ՄՍ և Հ» ամբիոն, տ.գ.դ. պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [harash@seua.am](mailto:harash@seua.am)

- 15 Հարությունյան Արտյոմ Շիրազի մագիստրոս, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [artvomharutyunyans@gmail.com](mailto:artvomharutyunyans@gmail.com)
- 16 Հարությունյան Գևորգ Արմենի «Միկրոէլեկտրոնային համակարգեր և սխեմաներ» ամբիոնի դասախոս, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [harutyunyangevorgam@gmail.com](mailto:harutyunyangevorgam@gmail.com)
- 17 Հարությունյան Միրանուշ Աշոտի ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, գիտաշխատող, տ.գ.թ.,  
**Էլ. հասցե** - [sirhar@mail.ru](mailto:sirhar@mail.ru)
- 18 Մաիլյան Լևոն Մամվելի ՀԱՊՀ-ի հայցորդ,  
**Էլ. հասցե** - [L.S.MAYILYAN@yandex.ru](mailto:L.S.MAYILYAN@yandex.ru)
- 19 Մարուխյան Դավիթ Կարենի Դիսքո Արմենիա ՓԲԸ, «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ ավագ ճարտարագետ, ասպիրանտ  
**Էլ. հասցե** - [marukhyanjr@gmail.com](mailto:marukhyanjr@gmail.com)
- 20 Մարուխյան Ռստանիկ Զավենի ՀԱՊՀ պատվավոր պրոֆեսոր, պրոֆեսոր, տ.գ.թ.  
**Էլ. հասցե** - [vosmar@seua.am](mailto:vosmar@seua.am)
- 21 Մելքոնյան Գոհար Ադասու Կառավարման համակարգերի ամբիոն, նախկին հայցորդ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [g.melqonyan@polytechnic.am](mailto:g.melqonyan@polytechnic.am)
- 22 Մինասյան Համբարձում Դավթի Տեղեկատվական անվտանգություն և ծրագրային ապահովման ամբիոն, դասախոս, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [h.minasyan@polytechnic.am](mailto:h.minasyan@polytechnic.am)
- 23 Պասկեիցյան Տիգրանուհի Գևորգի ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ, գիտաշխատող,  
**Էլ. հասցե** - [tigranuhi2@mail.ru](mailto:tigranuhi2@mail.ru)
- 24 Սահակյան Նինա Գագիկի հայցորդ, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [nina.sahakyan@mail.ru](mailto:nina.sahakyan@mail.ru)
- 25 Սասունցյան Մարինե Էդուարդի տ.գ.թ., դոցենտ «Քիմիական տեխնոլոգիաների, Բնապահպանության և Կենսաանվտանգության» ամբիոնի, ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [msasuntsyan@mail.ru](mailto:msasuntsyan@mail.ru)
- 26 Ստակյան Միհրան Գրիգորի տ.գ.թ., պրոֆեսոր, ա.գ.ա. ՃՇՀԱՀ,  
**Էլ. հասցե** - [Stakyan.mihran@yandex.ru](mailto:Stakyan.mihran@yandex.ru)
- 27 Սարգսյան Արևիկ Մերգելի ՏՀՏԷ ինստիտուտի Ռադիոսարքեր և կապի համակարգեր ամբիոնի պրոֆեսոր, պրոֆեսոր, տ.գ.թ., ՀԱՊՀ,  
**Էլ. հասցե** - [antenna@seua.am](mailto:antenna@seua.am)
- 28 Սաֆարյան Աշոտ Յուրիի ճ.թեկն., դոց., ա.գ.ա., ՃՇՀԱՀ,  
**Էլ. հասցե** - [ayusafaryan@gmail.com](mailto:ayusafaryan@gmail.com)
- 29 Վարդանյան Ռուբեն Արթուրի ՀԱՊՀ, ՋԷ և ՇՄՊ ամբիոնի ասպիրանտ  
**Էլ. հասցե** - [r.yardanyan@gazpromarmenia.am](mailto:r.yardanyan@gazpromarmenia.am)
- 30 Փիրումյան Նարինե Վիլիկի տ.գ.թ., ա.գ.ա., ՃՇՀԱՀ,  
**Էլ. հասցե** - [pirumyannarine@gmail.com](mailto:pirumyannarine@gmail.com)

## СПИСОК АВТОРОВ

- 1 Абгарян Оганнес Самвелович** аспирант, кафедра Информационных технологий и автоматизации, НПУА,  
Эл. почта - [abgaryanhov@gmail.com](mailto:abgaryanhov@gmail.com)
- 2 Агбалиян Сурен Геворкович** д.т.н., профессор, кафедра Metallургии и материаловедения, НПУА,  
Эл. почта - [metalsur@polytechnic.am](mailto:metalsur@polytechnic.am)
- 3 Акармазян Аик Саакович** к.т.н., доцент, НПУА,  
Эл. почта - [h.akarmazyan@polytechnic.am](mailto:h.akarmazyan@polytechnic.am)
- 4 Акоюн Ася Рафаеловна** научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии, НАН РА  
Эл. почта - [assia77@yandex.ru](mailto:assia77@yandex.ru)
- 5 Амбарцумян Нарек Акопович** Аспирант, кафедры Радиоустройств и систем связи, НПУА,  
Эл. почта - [n.hamardzumyan@polytechnic.am](mailto:n.hamardzumyan@polytechnic.am)
- 6 Арутюнян Артем Ширазович** магистр, НПУА,  
Эл. почта - [artyomharutyunyans@gmail.com](mailto:artyomharutyunyans@gmail.com)
- 7 Арутюнян Ашот Геворгович** д.т.н., профессор, кафедра Микроэлектронных систем и схем, НПУА,  
Эл. почта - [harash@seua.am](mailto:harash@seua.am)
- 8 Арутюнян Геворг Арменович** преподаватель, кафедра Микроэлектронных систем и схем, НПУА,  
Эл. почта - [harutyunyangevorgam@gmail.com](mailto:harutyunyangevorgam@gmail.com)
- 9 Арутюнян Сирануш Ашотовна** к.т.н., научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии, НАН РА,  
Эл. почта - [sirhar@mail.ru](mailto:sirhar@mail.ru)
- 10 Буннатян Лиана Меружановна** к.т.н., доцент, кафедра Систем управления, НПУА,  
Эл. почта - [buniatyan84@mail.ru](mailto:buniatyan84@mail.ru)
- 11 Варданын Рубен Артурович** аспирант, кафедра Теплоэнергетики и охраны окружающей среды, НПУА,  
Эл. почта - [r.vardanyan@gazpromarmenia.am](mailto:r.vardanyan@gazpromarmenia.am)
- 12 Гаспарян Олег Николаевич** д.т.н., профессор, кафедра Систем управления, НПУА,  
Эл. почта - [ogasparyan@gmail.com](mailto:ogasparyan@gmail.com)
- 13 Григорян Ален Гамлетович** магистрант, кафедра Систем управления, НПУА,  
Эл. почта - [alen.grigoryan@polytechnic.am](mailto:alen.grigoryan@polytechnic.am)
- 14 Давидян Артур Каренович** научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии, НАН РА  
Эл. почта - [artur.davidyan21@gmail.com](mailto:artur.davidyan21@gmail.com)
- 15 Давитян Карен Генрихович** д.т.н., зав. лаб., Институт общей и неорганической химии, НАН РА,  
Эл. почта - [sdmamager2012@gmail.com](mailto:sdmamager2012@gmail.com)
- 16 Давтян Нвард Юриковна** аспирант, кафедра Теплоэнергетики и охраны окружающей среды, НПУА,  
Эл. почта - [davtyannvard8@gmail.com](mailto:davtyannvard8@gmail.com)

- 17 Маилян Левон Самвелович** соискатель, НПУА,  
Эл. почта - [L.S.MAYILYAN@yandex.ru](mailto:L.S.MAYILYAN@yandex.ru)
- 18 Марухян Востаник Завенович** к.т.н., профессор, НПУА,  
Эл. почта - [vosmar@seua.am](mailto:vosmar@seua.am)
- 19 Марухян Давит Каренович** старший инженер, аспирант  
ЗАО «Синописис Армения»  
Эл. почта - [marukhyanjr@gmail.com](mailto:marukhyanjr@gmail.com)
- 20 Мелконян Гоар Агасиевна** соискатель, кафедра Систем управления, НПУА,  
Эл. почта - [goharik-melqonyan@mail.ru](mailto:goharik-melqonyan@mail.ru)
- 21 Минасян Амбарцум Давидович** преподаватель, кафедра Информационной безопасности и программного обеспечения, НПУА  
Эл. почта - [h.minasyan@polytechnic.am](mailto:h.minasyan@polytechnic.am)
- 22 Паскевичян Тигрануи Геворговна** научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии, НАН РА  
Эл. почта - [tigranuhi2@mail.ru](mailto:tigranuhi2@mail.ru)
- 23 Пирумян Нарине Виликовна** к.т.н., с.н.с., НУАСА,  
Эл. почта - [pikumyannarine@gmail.com](mailto:pikumyannarine@gmail.com)
- 24 Саакян Нина Гагиковна** соискатель, НПУА,  
Эл. почта - [nina.sahakyan@mail.ru](mailto:nina.sahakyan@mail.ru)
- 25 Саргсян Аревик Сергеевна** к.т.н., профессор, кафедра Радиоустройств и систем связи, НПУА,  
Эл. почта - [antenna@seua.am](mailto:antenna@seua.am)
- 26 Сасунцян Марине Эдуардовна** к.т.н., доцент, кафедра Химических технологий, экологии и безопасности жизнедеятельности, НПУА,  
Эл. почта - [msasuntsyan@mail.ru](mailto:msasuntsyan@mail.ru)
- 27 Сафарян Ашот Юрьевич** к.архит., доц., с.н.с., НУАСА,  
Эл. почта - [ayusafaryan@gmail.com](mailto:ayusafaryan@gmail.com)
- 28 Стакян Мигран Григорьевич** д.т.н., профессор, с.н.с., НУАСА,  
Эл. почта - [Stakyan.mihran@yandex.ru](mailto:Stakyan.mihran@yandex.ru)
- 29 Тадевосян Арташес Ваганович** к.т.н., профессор, НПУА,  
Эл. почта - [tadartashes@gmail.com](mailto:tadartashes@gmail.com)
- 30 Хачатрян Рафаел Норайрович** аспирант, кафедра Микроэлектронных систем и схем, НПУА,  
Эл. почта - [raf.khachatryan4@gmail.com](mailto:raf.khachatryan4@gmail.com)

## LIST OF THE AUTHORS

- 1 Abgaryan Hovhannes Samvel** Post graduate student of the Chair “Information Technologis and Automation”, NPUA,  
**E-mail - [abgaryanhov@gmail.com](mailto:abgaryanhov@gmail.com)**
- 2 Aghbalyan Suren Geworg** Dr. of tech. sci., Prof. of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA,  
**E-mail - [metalsur@polytechnic.am](mailto:metalsur@polytechnic.am)**
- 3 Akarmazyan Hayk Sahak** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA  
**E-mail - [h.akarmazyan@polytechnic.am](mailto:h.akarmazyan@polytechnic.am)**
- 4 Buniatyan Liana Meruzhan** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair "Control Systems", NPUA,  
**E-mail - [buniatyan84@mail.ru](mailto:buniatyan84@mail.ru)**
- 5 Davidyan Arthur Karen** Scientific worker, NAS RA, Institute of General and Inorganic Chemistry,  
**E-mail - [artur.davidyan21@gmail.com](mailto:artur.davidyan21@gmail.com)**
- 6 Davityan Karen Henrik** Dr. sci., Ph.D, NAS RA, Institute of General and Inorganic Chemistry, Head of laboratory,  
**E-mail - [sdmanager2012@gmail.com](mailto:sdmanager2012@gmail.com)**
- 7 Davtyan Nvard Yurik** Post graduate student of the Chair Heat- power Engineering and Environmental Protection, NPUA,  
**E-mail - [davtyannvard8@gmail.com](mailto:davtyannvard8@gmail.com)**
- 8 Gasparyan Oleg Nikolay** Dr. of tech. Sci., Prof., of the Chair "Control Systems", NPUA,  
**E-mail - [ogasparyan@gmail.com](mailto:ogasparyan@gmail.com)**
- 9 Grigoryan Alen Hamlet** Graduate student, of the Chair "Control Systems", NPUA,  
**E-mail - [alen.grigoryan@polytechnic.am](mailto:alen.grigoryan@polytechnic.am)**
- 10 Hakobyan Asya Rafayel** Scientific worker, NAS RA, Institute of General and Inorganic Chemistry, research scientist,  
**E-mail - [assia77@yandex.ru](mailto:assia77@yandex.ru)**
- 11 Hambarzumyan Narek Hakob** Post graduate student at the Chair "Radio Equipment and Communication Systems", NPUA,  
**E-mail - [n.hambarzumyan@polytechnic.am](mailto:n.hambarzumyan@polytechnic.am)**
- 12 Harutyunyan Artyom Shiraz** Graduate student, NPUA,  
**E-mail - [artyomharutyunyans@gmail.com](mailto:artyomharutyunyans@gmail.com)**
- 13 Harutyunyan Ashot Gevorg** Dr. of tech. Sci., Prof. of the Chair "Microelectronic Systems and Circuits", NPUA,  
**E-mail - [harash@seua.am](mailto:harash@seua.am)**
- 14 Harutyunyan Gevorg Armen** Lecturer at the Chair "Microelectronic Systems and Circuits", NPUA,  
**E-mail - [harutyunyangevorgam@gmail.com](mailto:harutyunyangevorgam@gmail.com)**
- 15 Harutyunyan Siranush Ashot** Cand. of tech.sci., NAS RA, scientific worker, Institute of General and Inorganic Chemistry,  
**E-mail - [sirhar@mail.ru](mailto:sirhar@mail.ru)**
- 16 Khachatryan Rafayel Norayr** Post graduate student of the Chair "Microelectronic Systems and Circuits", NPUA,  
**E-mail - [raf.khachatryan4@gmail.com](mailto:raf.khachatryan4@gmail.com)**

- 17 Marukhyan Davit Karen** Post graduate student, Senior Engineer DISQO Armenia CJSC, “Synopsys Armenia” CJSC,  
**E-mail** - [marukhyanjr@gmail.com](mailto:marukhyanjr@gmail.com)
- 18 Marukhyan Vostanik Zaven** Honorary Professor Cand. of tech. sci. Professor, NPUA  
**E-mail** - [vosmar@seua.am](mailto:vosmar@seua.am)
- 19 Mayilyan Levon Samvel** Probationer, NPUA,  
**E-mail** - [L.S.MAYILYAN@yandex.ru](mailto:L.S.MAYILYAN@yandex.ru)
- 20 Melkonyan Gohar Agasi** Probationer of the Chair "Control Systems", NPUA,  
**E-mail** - [goharik-melqonyan@mail.ru](mailto:goharik-melqonyan@mail.ru)
- 21 Minasyan Hambardzum Davit** "Information Security and software development, NPUA,  
**E-mail** - [h.minasyan@polytechnic.am](mailto:h.minasyan@polytechnic.am)
- 22 Paskevichyan Tigranuhi Gevorg** Scientific worker, NAS RA, Institute of General and Inorganic Chemistry, research scientist,  
**E-mail** - [tigranuhi2@mail.ru](mailto:tigranuhi2@mail.ru)
- 23 Pirumyan Narine Vilik** Cand. of tech. Sci., NUACA,  
**E-mail** - [pirumyannarine@gmail.com](mailto:pirumyannarine@gmail.com)
- 24 Safaryan Ashot Yuri** Cand. of tech. Sci., NUACA,  
**E-mail** - [ayusafaryan@gmail.com](mailto:ayusafaryan@gmail.com)
- 25 Sahakyan Nina Gagik** Probationer, NPUA,  
**E-mail** - [nina.sahakyan@mail.ru](mailto:nina.sahakyan@mail.ru)
- 26 Sargsyan Arevik Sergey** Dr. sci., Prof. of the Chair "Radio Equipment and Communication Systems", NPUA,  
**E-mail** - [antenna@seua.am](mailto:antenna@seua.am)
- 27 Sasuntsyan Marine Eduard** Associ. Prof., Cand. of tech. sci., Chemical Technologies, Ecology and Life Safety, NPUA,  
**E-mail** - [msasuntsyan@mail.ru](mailto:msasuntsyan@mail.ru)
- 28 Stakyan Mihran Grigor** Dr. of tech. Sci., Prof., NUACA,  
**E-mail** - [Stakyan.mihran@yandex.ru](mailto:Stakyan.mihran@yandex.ru)
- 29 Tadevosyan Artashes Vahan** Cand. of tech. sci., Prof., NPUA  
**E-mail** - [tadartashes@gmail.com](mailto:tadartashes@gmail.com)
- 30 Vardanyan Ruben Arthur** Post graduate student of the Chair Heat- power Engineering And Environmental Protection, NPUA,  
**E-mail** - [r.vardanyan@gazpromarmenia.am](mailto:r.vardanyan@gazpromarmenia.am)

«Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, մետալուրգիա, նյութագիտություն, ընդերքօգտագործման տեխնոլոգիաներ, շինարարական կառուցվածքներ, հիդրավլիկա և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էներգետիկա, էլեկտրատեխնիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխնիկա և ինֆորմատիկա, ռադիոէլեկտրոնիկա, միկրոէլեկտրոնիկա, լազերային տեխնիկա, ավտոմատացում և կառավարման համակարգեր:

Հանդեսում լուսաբանվում են ակադեմիական և ճյուղային գիտահետազոտական ինստիտուտների, բուհերի, գիտաարտադրական միավորումների և այլ կազմակերպությունների գիտական գործունեության առավել կարևոր արդյունքները:

Հանդեսի հիմնական նպատակն է խթանել գիտատեխնիկական առաջընթացը և նպաստել արտադրության մեջ այդ արդյունքների ներդրմանը:

Հանդեսը նախատեսված է ճարտարագետների, հետազոտողների և գիտնականների լայն շրջանների համար: Լույս է տեսնում երեք ամիսը մեկ անգամ:

В журнале "Известия Национальной академии наук РА и Национального политехнического университета Армении. Серия технических наук" публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих основные разделы технических наук: машиностроение, металлургия, материаловедение, технологии недропользования, строительные конструкции, гидравлика и гидротехнические сооружения, энергетика, электротехника, научное приборостроение и измерительная техника, вычислительная техника и информатика, радиоэлектроника, микроэлектроника, лазерная техника, автоматизация и системы управления.

Журнал является периодическим изданием, освещающим наиболее важные результаты научной деятельности академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и др.

Основная цель журнала - пропагандировать фундаментальные и прикладные исследования в области технических наук, способствовать внедрению их результатов и ускорению научно-технического прогресса в производстве.

Журнал рассчитан на широкий круг ученых, исследователей и инженеров. Выходит один раз в три месяца.

The journal "Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences" publishes the results of theoretical and experimental investigations concerning the main branches of technical sciences: mechanical engineering, metallurgy, material science, mining engineering, natura utilization, building constructions, hydraulics and hydrotechnical constructions, power and electrical engineering, scientific instrument making and measuring devices, computer science and informatics, radioelectronics, microelectronics, laser equipment, automation and control systems.

The journal is a periodical edition that presents the most important results of scientific activities at academic and branch scientific-research institutions, universities, research - industrial companies, etc.

The main task of the journal is the propaganda of fundamental and applied investigations in the field of technical sciences, and the promotion of their introduction and the acceleration of scientific and technological progress in industry.

The journal is intended for a wide range of scientists, researchers and engineers. It is published once in three months.

\*\*\*

## ՀՈՂՎԱԾՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է ըստ հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով, համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափսի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-4,75սմ, Left-6,2սմ, Right-1,8սմ, Footer-4,5սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,15, պարբերությունը (First line)՝ 1 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է Sylfaen տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերեն կամ անգլերեն լինելու դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ձախ անկյունում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիչը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԸԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում՝ գլխատառերով հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում: Հոդվածի վերնագիրը տրվում է հեղինակի ազգանվանը հաջորդող տողի կենտրոնում՝ bold, ամբողջությամբ գլխատառերով՝ 10 տառաչափով՝ հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտացիա) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 500 նիշից ոչ ավելի՝ ներառյալ միջակայքերը, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան վերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծի մեջ:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ. » և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հասկանումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի զետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակությունը, թվականը, էջերի քանակը:

8. Գրականության ցանկին հաջորդում են ամփոփումները մյուս երկու լեզուներով (եթե տեքստը հայերեն է, ամփոփումները նախ՝ ռուսերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե ռուսերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե անգլերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ ռուսերեն): Ամփոփումները բոլոր երեք լեզուներով իրենց բովանդակությամբ և առանցքային բառերով պետք է լինեն նույնական:

9. Տեքստը ստորագրվում է հեղինակ(ներ)ի կողմից, նշվում է նյութը խմբագրություն հանձնելու ամսաթիվը: Տեքստի խմբագրված և սրբագրված տարբերակը համաձայնեցվում է հեղինակ(ներ)ի հետ:

10. Հեղինակ(ներ)ն առանձին էջով ներկայացնում է (են) ազգանուն, անուն, հայրանունը (լրիվ), աշխատավայրի, սովորելու վայրի լրիվ անվանումը, զբաղեցրած պաշտոնը, գիտական աստիճանը, հեռախոսահամարները (աշխատանքային, տան և բջջային):

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 4,75cm, Left – 6,2cm, Right – 1,8cm, Footer – 4,5cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,15, красная строка (First line) – 1cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт Sylfaen (размер шрифта - 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԴ, УДК, UDC); строкой ниже - инициалы (И.О.) и фамилия - заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен состоять не более чем из 500 знаков, включая пробелы. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание **“Ключевые слова”** - Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова *“Рис.”*, *“Таблица”*, а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Словосочетание **“СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ”** располагается в центре строки заглавными буквами, Bold. Цитированная литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** - Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

## **RULES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPTS**

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 4.75 cm, Left – 6.2 cm, Right – 1.8 cm, Footer – 4.5 cm, Line-spacing – 1.15 cm, the first line – 1 cm. Texts in Armenian should be printed by the Sylfaen, font size 10, and the texts in by Times New Roman, in font size 10 .

2. On the top left corner, the Universal Decimal Classifier is placed in the language of the manuscript (ՀՏԴ, ՄՃԿ, UDC). The initials and the surname(s) in font size 10, bold for texts in Armenian, English and Russian should be in the centre of the next line. The title should be placed in the centre of the line following the author's surname in font size 10, bold, all in capital letters for texts in Armenian, English and Russian.

3. The text begins with an abstract in the language it is presented. It ends with keywords in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for the ones in English and Russian. Only the word “Keywords” should be bold, italic. The summary should not exceed 500 characters including the spaces, the number of keywords or word combinations - 4-8.

4. The papers should include an introduction briefly introducing the state of the problem area, the importance of the subject and the aim of investigation, as well as sections describing the statement of the problem and selection of the methodology, the results of investigation, conclusion (other sections if necessary) with subtitles, and it should end with the list of references.

5. The references in the text should be given in square brackets. The formulae should be introduced by the Microsoft Equation Editor. They should be printed from a new line in italic, font size 11 in the center of the line, and if necessary numbered at the end of the line in round brackets..

6. Figures and tables should follow their references given in the text. The words “Fig”, “Table”, the figure inscriptions and the table names should be printed in italic, in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for texts in English and Russian.

7. The text is followed by the references in font size 9 for texts in Armenian and in font size 10 for texts in English and Russian. Only the author's initials and surname should be bold. The word “References” should be placed in the centre of the line in capital letters. In the list of references, each source should be enumerated according to its reference number in the text. For the periodicals, the references should be introduced in the following style: the author's surname, initials, title, year, numbers of the volume and issue, page numbers, and for books – the authors names, full title, publication place, publisher, year, total number of pages.

8. The references are followed by the abstracts in the other two languages. If the text is in Armenian, the abstracts should be first in Russian and then in English. The text in Russian should be followed first by Armenian and then by English abstracts, while the texts in English should be followed first by Armenian, then by Russian abstracts. The abstracts in all the three languages should be identical in content and keywords.

9. The manuscript should be signed by the author(s) with indication of the submission date. The edited and proofread version of the manuscript should be agreed upon by the author(s).

10. On a separate page, the author(s) should introduce his/her/their full surname(s), name(s), patronymic(s); the full name(s) of employment place, educational institution; the position occupied scientific degree, telephone numbers (office, home, mobile).



ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ  
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И НАЦИОНАЛЬНОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

PROCEEDINGS

OF THE REPUBLIC OF ARMENIA NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES AND  
NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF ARMENIA

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

2025

1

ՀԱՏՈՐ

ТОМ 78

VOLUME

ՀՈՒՆՎԱՐ - ՄԱՐՏ

ЯНВАРЬ – МАРТ

JANUARY - MARCH

Հրատ. Խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 11.02.2026

Թուղթը՝ «օֆսեթ»։ Տպագրությունը՝ ռիզո: Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16:

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 10.5 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 29: Տպաքանակ՝ 150

Հայաստանի Ազգային

Պոլիտեխնիկական

Համալսարանի

«Պոլիտեխնիկ»

տպագրահրա-

տարակչություն

Երևան, Տերյան 105

Типографско-

издательский центр

«Политехник»

Национального

политехнического

университета Армении

Ереван, ул. Теряна 105,

“Polytechnic” Publishing – House

National Polytechnic University of

Armenia

105 Teryan str. Yerevan

[polytechpolygraph@gmail.com](mailto:polytechpolygraph@gmail.com)