

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ (գլխ. խմբ.
տեղակալ), Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ,
Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Մ. ԴԱԶԱՐՅԱՆ,
Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Վ.Շ. ՄԵԼԻԿՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈՒՉՈՒԿՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.Х. ГРИГОРЯН (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН, В.В. БУНИАТЯН,
Ж.Д. ДАВИДЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН, А.Т. КУЧУКЯН, В.З. МАРУХЯН,
В.Ш. МЕЛИКЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН, В.С. САФАРЯН,
С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (editor-in-chief), A.Kh. GRIGORYAN (vice-editor-in-chief),
Z.K. STEPANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN, V.V. BUNIATYAN,
Zh.D. DAVIDYAN, S.P. DAVTYAN, S.M. GHAZARYAN, A.T. KUCHUKYAN,
V.Z. MARUKHYAN, V.Sh. MELIKYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN,
V.A. SAFARYAN, S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՄԵՅԴԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ԴԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА
Известия НАН РА и НПУА (сер. техн. наук), 2017

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ.Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Հ.Ա. ԳԱԼՈՅԱՆ

ՀՈԾ ԵՎ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԿԼՈՐ ՀԱՏՈՒՅԹՈՎ ՆՄՈՒՇՆԵՐԻ ԲԱՑ ՄԻՋԱՍԵՂՄՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՑԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Կատարվել է ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱԾՄ) հոծ և եռակալված նյութերից գլանական նմուշների բաց միջասեղման գործընթացների մոդելավորում և լարվածադեֆորմացիոն վիճակի հետազոտում, երբ տեղի է ունենում բացարձակ կոշտ մամլամատի տակ նմուշի նյութի հավասար իջեցում: Հոծ նյութից գլանի դեպքն իրականացվում է՝ օգտագործելով շառավղի ուղղությամբ երեք տարբեր ճնշում հաղորդող երեք կոշտ գլանական մասերից բաղկացած մամլամատ, և քննարկվել են միայն առաջին պլաստիկ դեֆորմացման առաջացման տվյալները: Եռակալված նյութից գլանի դեպքում նմուշի հավասար իջեցումն ապահովվում է մամլամատի տակ նյութի համապատասխան կետերի նմուշի առանցքի ուղղությամբ հավասար տեղափոխությամբ, և գլանի բավականին մեծ պլաստիկ դեֆորմացման դեպքի տվյալների հետազոտման հետ միասին ուսումնասիրվում են նաև նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիները:

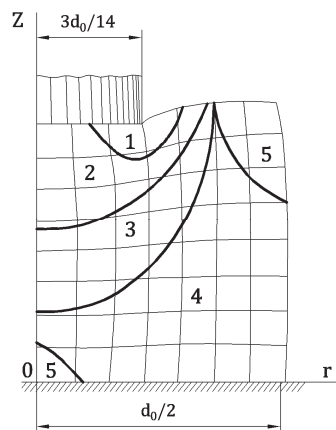
Առանցքային բառեր. հոծ և եռակալված նյութ, գլանի բաց միջասեղմում, առանցքասիմետրիկ դեֆորմացում, լարվածադեֆորմացիոն վիճակ, միջին լարում, ծակոտկենություն:

Մեքենաշինության տեխնոլոգիական գործընթացներում լայնորեն օգտագործվում են հոծ և եռակալված գլանական նախապատրաստվածքների պլաստիկ դեֆորմացման տարբեր մեթոդներ, որոնց ձևափոխման և խտացման օրինաչափությունները զգալի ազդեցություն են ունենում ստացված նյութերի ֆիզիկամեխանիկական և շահագործման հատկությունների վրա: Այդ հարցերի հետազոտումը հիմնված է համապատասխան նյութերի պլաստիկության տեսությունների վրա:

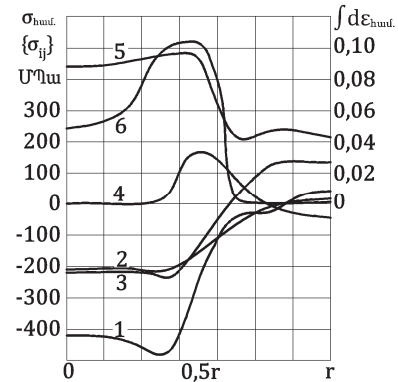
[1]-ում վերլուծվել են տարբեր հեղինակների կողմից մշակված ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության տեսությունները (ՇՆՊՏ), բերված են փոշենյութերի ամրացումը և իրական ծակոտկենությունը հաշվի առնող դեֆորմացիոն և հոսունության տեսությունների հավասարումները, ցույց է տրվել, որ ծակոտկենության բացակայության դեպքում այդ բանաձևերից ստացվում են հոծ նյութերի համապատասխան հավասարումները, լուսաբանվել են նյութերի ընթացիկ ծակոտկենության որոշման և դրանց դեֆորմացման գրաֆիկների կառուցման հարցերը, մշակվել են փոշենյութերի ճնշմամբ մշակման խնդիրների լարվածադեֆորմացիոն վիճակների հետազոտման ճշգրիտ, մոտավոր և թվային մեթոդներ, ներառյալ ավելի հեռանկարային՝ վերջավոր տարրերի մեթոդը (ՎՏՄ), ինչպես նաև լուծվել են բազմաթիվ տեխնոլոգիական խնդիրներ:

Սկզբնական D տրամագծերի և h բարձրության գլանական նախապատրաստվածքի (նմուշի) բաց և փակ d տրամագծի մամլամատով միջասեղմման դեպքերում [2] առաջանում է անցք: [2] - ում քննարկվում են նմուշի սկզբնական ձևի փոփոխության և դրա դեֆորմացման տեսակարար - միջին ուժի ($p=P/A$, որտեղ P - ն դեֆորմացման ուժն է, իսկ A - ն՝ մամլամատի լայնական հատույթի մակերեսը) վրա D/d հարաբերության ազդեցության հարցերը, ինչպես նաև կատարելով բազմաթիվ ենթադրություններ՝ բաց և փակ միջասեղմման խնդիրների վերլուծական մեթոդով լուծման դեպքերում ստացվել են մոտավոր բանաձևեր:

[3] - ում ներկայացվել են եռակալված գլանական նախապատրաստվածքի խտացման վրա ազդող դեֆորմացիոն սխեմայի տեսական ուսումնասիրության արդյունքները համասեռ և անհամասեռ պլաստիկ դեֆորմացման դեպքում: Բացահայտվել են միջասեղմման դեպքում ՎՏՄ ստացված **լարվածադեֆորմացիոն վիճակի** բաղադրիչների և նյութի ընթացիկ ծակոտկենության բաշխման (նկ. 1 և 2) առանձնահատկությունները, որոնք թույլ են տալիս կանխատեսել տեխնոլոգիական գործընթացների ռեժիմները և դեֆորմացման աստիճանի մեծ միջակայքի դեպքում նախապատրաստվածքի խտացման օրինաչափությունները: Ընդ որում, ՎՏՄ-ով խնդրի լուծման թվային հաշվարկը կատարվել է Գ.Վ. Մուսայելյանի կողմից՝ FORTRAN-ի միջավայրում կազմված ծրագրով:



Նկ. 1. Պլաստիկ դեֆորմացված նմուշի առանցքային հատույթի կեսի ծակոտկենության բաշխման գոտիները [3]



Նկ. 2. Պլաստիկ դեֆորմացված նմուշի վերնի մակերևույթի կեսի վրա լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների բաշխման էպյուրները [3]

Նկ.1-ում ըստ նմուշի գոտիների՝ 16% սկզբնական ծակոտկենության փոփոխված արժեքների մեծություններն են. 1-ում նյութի միջին ծակոտկենությունը դարձել է 10,5%, 2-ում՝ 13,3%, 3-ում՝ 15%, 4-ում՝ 15,8%, 5-ում՝ 16%:

Նկ.2-ում պատկերված են վերևի մակերևույթում առանցքային լարումների (1), շառավղային լարումների (2), շրջանային լարումների (3), շոշափող լարումների (4), համաթեքային լարումների (5) և պլաստիկ դեֆորմացումների համաթեքային աճի ինտեգրալի (6) էպյուրները: Այս կորերի համադրումը նկ.2 – ում ցույց է տալիս, որ ծակոտկեն նմուշի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչներն ընդունում են իրենց առավելագույն արժեքը նմուշի և մամլամատի եզրի հպման մասերում;

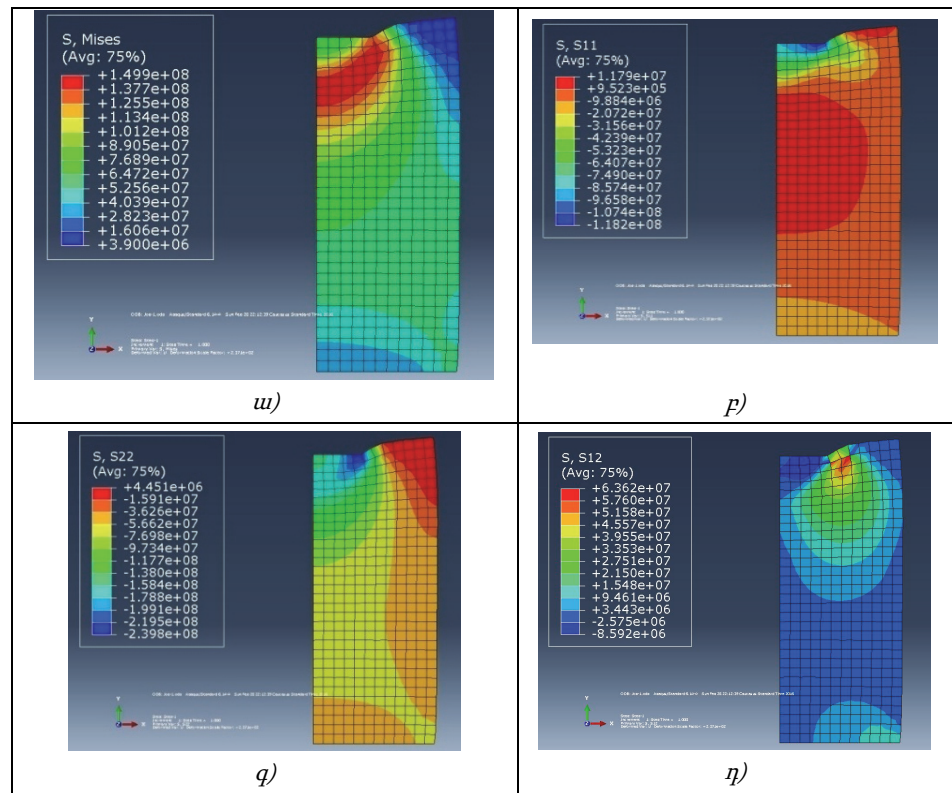
[4] – ում վերլուծվել են հեղինակային խմբի կողմից ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱՕՄ) կատարված հիմնական աշխատանքները: [1]-ում գլանական եռակալված ձողի մամլման գործընթացը մոդելավորվել է «ABAQUS»-ով: Խնդիրը լուծվել է առանց հակաճնշման և դրա երեք հետևյալ արժեքների համար՝ 80, 160, 240 ՄՊա: Դրանցից 0 և 240 ՄՊա հակաճնշումներով մամլման դեպքերի թվային տվյալները բերված են լարումների և դեֆորմացումների փոփոխման դաշտերի պատկերների տեսքով, ինչը թույլ է տալիս գործընթացի մասին պատկերացում կազմել՝ կառուցելով նաև դրանց փոփոխության գրաֆիկները: Խնդրի լուծման համար օգտագործվել է վերլուծական մեթոդով խնդրի լուծման դեպքում մշակված [5] - ի մեթոդը:

[6] – ում գլանական եռակալված ձողի մեծ հակաճնշումներով մամլման գործընթացը մոդելավորվել է ԱՕՄ –ում “ABAQUS”-ով: Օգտագործվել է [4]-ում մշակված խնդրի լուծման մեթոդը: Հիմնավորվել է մեծ հակաճնշման արժեքների ընտրության հարցը: Ստացված լարվածային վիճակի բաղադրիչների և նյութի ծակոտկենության թվային արդյունքների վերլուծության հիման վրա բացահայտվել են գործընթացի որոշ առանձնահատկություններ: Կատարվել են համապատասխան փորձարարական և տեխնոլոգիական հետազոտություններ:

Նշենք, որ [2] և այլ հայտնի գիտական հետազոտությունների ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս, որ գլանական նմուշների միջասեղման գործընթացի՝ վերլուծական մեթոդով լուծմամբ հնարավոր չէ ստանալ այնպիսի ճշգրիտ արդյունքներ, ինչպիսիք ստացվում են ՎՏՄ-ի օգտագործման դեպքում: Սակայն ՎՏՄ-ով հետազոտությունները բավականին քիչ են, մանավանդ ԱՕՄ-ում լուծվածները, ինչով և հիմնավորվում է այդ բնագավառում գիտական հետազոտությունների կատարման արդիականությունը:

Աշխատանքի նպատակն է ԱՕՄ-ում հոծ և եռակալված նյութից գլանական նմուշների բաց միջասեղման գործընթացների լարվածադեֆորմացիոն վիճակների և նյութի ծակոտկենության բաշխման հետազոտումը՝ բացարձակ կոշտ մամլամատի տակ նմուշի նյութի հավասար իջեցման դեպքում, ինչպես նաև ստացված արդյունքների համեմատումը [2, 3] – ի տվյալների հետ:

1. Հոծ նյութից գլանական նմուշի միջասեղման խնդրի լուծումը՝ օգտագործելով շառավղի ուղղությամբ երեք տարբեր ճնշում հաղորդող երեք կոշտ գլանական մասերից բաղկացած մամլամատ: ԱՕՄ – ում մոդելավորվել է $h=40$ մմ բարձրությամբ և $D=30$ մմ տրամագծով գլանի (որի նյութի Յունգի մոդուլը $2 \cdot 10^5$ ՄՊա է, Պուասոնի գործակիցը՝ 0,3 և հոսունության սահմանը՝ 150 ՄՊա) սեղմման գործընթացը, ինչը հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել գործընթացի ժամանակ առաջացած լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բազմաթիվ տվյալները (նկ.3 և աղ. 1): Ընդ որում, նկ.3 – ում աղյուսակի տեսքով ըստ գույների բերված են նշված լարումների արժեքները՝ արտահայտված պասկալներով:



Նկ. 3. Գլանի բաց միջասեղման դեպքում լարվածային վիճակի Միզեսի (ա), շառավղային (բ), առանցքային (գ) և շոշափող (դ) լարումների բաշխման գոտիները

Դիտարկվում է գլանի տրամագծային հատույթի $\frac{1}{2}$ մասը, որի շառավղի կեսին հավասար իջեցումն իրականացվում է տարբեր ճնշումներով (150, 180, 265 ՄՊա) իրար հետ աշխատող 3 մասից բաղկացած մամլամատերի միջոցով, որոնցից առաջինի (ներսի փոքր մամլամատի) շառավիղը 2,5 մմ է, իսկ մյուսները սնամեջ են՝ համապատասխանաբար (2,5 և 5) մմ ու (5 և 7,5) մմ շառավիղներով:

Ընդ որում, մամլամատի այդ մասերի վրա ընկած դեֆորմացման ուժերի մեծություններն են համապատասխանաբար 0,74, 2,65 և 6,50 կՆ:

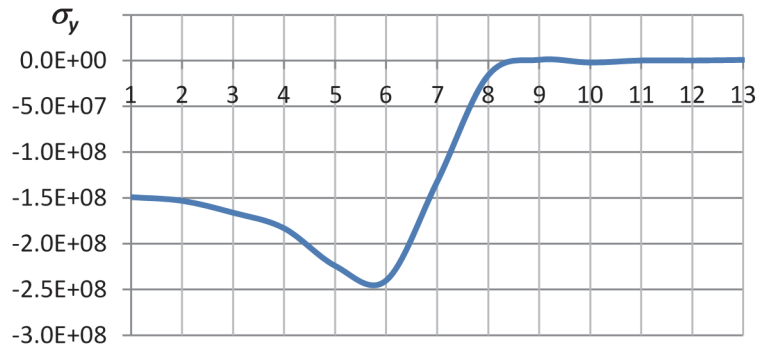
Աղյուսակ 1

Հոծ նյութից գլանի բաց միջասեղման տվյալները

Վերնի կետերը	S, Mises, ՄՊա	S11, ՄՊա	S22, ՄՊա	S33, ՄՊա	σ_0 , ՄՊա	S12, ՄՊա
1	63	-85	-149	-85	-106	1
2	65	-88	-153	-88	-110	-2
3	72	-95	-166	-94	-118	-4
4	81	-104	-183	-103	-130	-6
5	106	-118	-224	-119	-154	-8
6	136	-109	-240	-120	-156	17
7	101	-56	-132	-69	-86	37
8	35	-6	-16	-17	-13	17
9	14	9	1	-5	2	1
10	12	9	-2	-4	1	0
11	8	6	0	-3	1	-2
12	5	2	0	-3	0	-1
13	4	1	1	-3	0	-1

Առանցքասիմետրիկ խնդրի լուծման արդյունքում ստացվել են լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բոլոր բաղադրիչները գլանի բաց միջասեղման դեպքում, երբ տեղի է ունենում բացարձակ կոշտ մամլամատի տակ գլանի նյութի հավասար իջեցում: Ստացված բազմաթիվ տվյալներից դիտարկենք միայն առաջին պլաստիկ դեֆորմացման առաջացման դեպքերը: Նկ. 3 – ում գլանի առանցքային հատույթի կեսի վրա ցույց են տրված Միզենի ($\sigma_i = S$), շառավղային ($\sigma_r = S11$), առանցքային ($\sigma_y = S22$) և շոշափող ($\tau_{r\theta} = S12$) լարումների բաշխման գոտիները, իսկ աղ. 1- ում բերված են գլանի առանցքից հաշված վերնի եզրի 13 կետերում համապատասխան լարումների և միջին $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_r + \sigma_\theta)/3$ լարման արժեքները: Ընդ որում, $\sigma_\theta = S33$ -ը շրջանային լարումն է, որի հիմնական արժեքները (մամլամատի տակ) բավականին մոտ են շառավղային ($\sigma_r = S11$) լարումներին [7], իսկ σ_0 -ի տվյալներով (1) բանաձևով գնահատվում է նյութի խտացման գործընթացը:

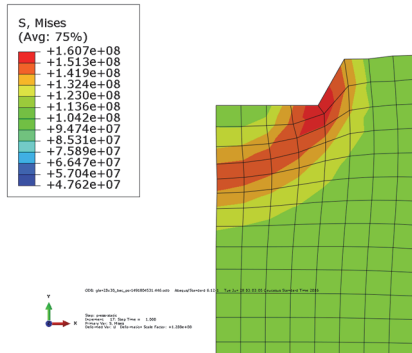
Նկ. 4-ում ցույց է տրված բաց միջասեղման դեպքում գլանի վերնի եզրի 13 կետերի տվյալներով կառուցված առանցքային $\sigma_y = S22$ լարումների գրաֆիկը: Ինչպես տեսնում ենք, դրա տեսքը ամբողջապես համապատասխանում է նկ. 2-ի թիվ 1 գրաֆիկին:



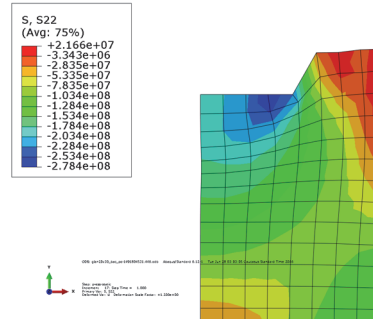
Նկ. 4. Բաց միջասեղմման դեպքում առանցքային $\sigma_y = S22$ լարումների գրաֆիկը՝ կառուցված գլանի վերնի եզրի 13 կետի տվյալներով

2. Եռակալված նյութից գլանական միջասեղմման խնդրի լուծումը՝ օգտագործելով մամլամատի տակ նախապատրաստվածքի նյութի կետերի առանցքի ուղղությամբ հավասար տեղափոխությունը: Խնդրի ԱՕՄ-ում մոդելավորման համար ընտրվել են նմուշի այլ չափսեր. տրամագիծը՝ $D=20$ մմ, բարձրությունը՝ $h=30$ մմ, նյութի տվյալները՝ խտությունը 7800 կգ/մ³, Յունգի մոդուլը՝ $2,1 \cdot 10^5$ ՄՊա, Պուասոնի գործակիցը՝ 0,3, սկզբնական հարաբերական խտության $\rho = 0,8$ (կամ ծակոտկենության $v_0=0,2$) և հոսունության սահմանի (150 ՄՊա) մեծությունները, ինչպես նաև դրա պլաստիկ դեֆորմացման գրաֆիկի երկու կետերի աղյուսակային տվյալները. 0,3 պլաստիկ դեֆորմացմանը համապատասխան լարումը՝ 160 ՄՊա և 0,5 – ին՝ 180 ՄՊա: SIMULIA ծրագրային միջավայրում տարրերի բաժանված ցանցի պարամետրերն են. կետերի քանակը՝ 225, տարրերի քանակը՝ 192 և քառանկյուն տարրերի տիպը՝ CAX4R:

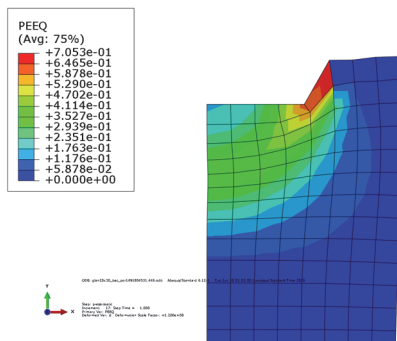
Խնդրի լուծման արդյունքում ստացվել են լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բոլոր բաղադրիչները գլանի բաց միջասեղմման դեպքում, երբ տեղի է ունենում բացարձակ կոշտ մամլամատի տակ գլանի նյութի հավասար իջեցում: Նկ. 5 – ում գլանի առանցքային հատույթի կեսի վրա ցույց են տրված Միզենի (σ_i) և առանցքային ($\sigma_y = S22$) լարումների, ինչպես նաև $\varepsilon_i = \text{PEEQ}$ դեֆորմացումների ինտենսիվության ու նյութի V (ԱՕՄ) ծակոտկենության բաշխման գոտիները:



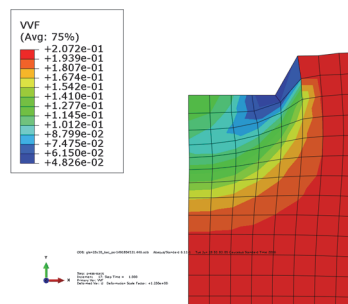
Լարումների ինտենսիվությունը



Առանցքային լարումները



Դեֆորմացումների ինտենսիվությունը



Նյութի ծակոտկենությունը

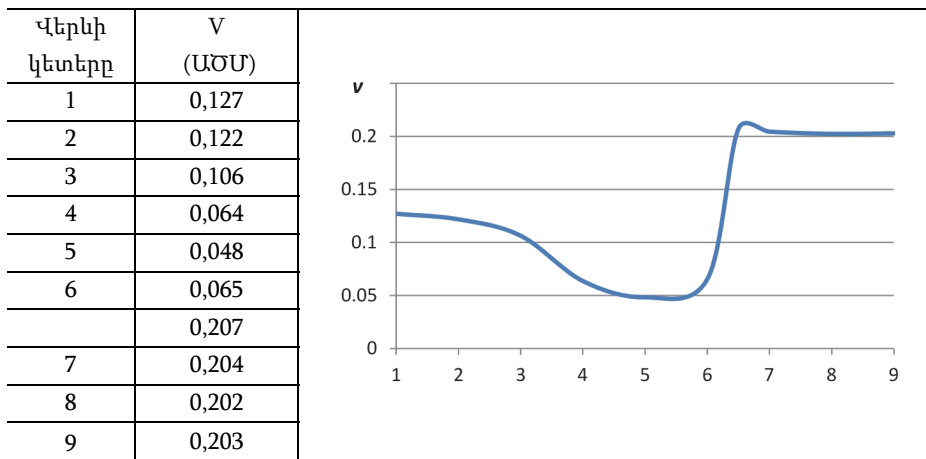
Նկ. 5. Տվյալները՝ տեղափոխություններով լուծված գլանի բաց միջասեղման դեպքում

Աղ. 2 – ում բերված են մամլամատի ազդման գլանի վերևի եզրից հաշված առանցքի 10 և արտաքին եզրի 10, ինչպես նաև գլանի առանցքից հաշված վերևի եզրի 9 կետերում համապատասխան լարումների մեծությունների և միջին $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_r + \sigma_\theta) / 3$ լարման արժեքները, որտեղ σ_r, σ_θ - շառավղային և շրջանային լարումներն են: Ընդ որում, σ_0 - ի արժեքները հետագայում հնարավորություն կտան վերլուծական մեթոդով որոշել ընթացիկ ծակոտկենության մեծությունները, V (ՀԱՇ):

Լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների տվյալները

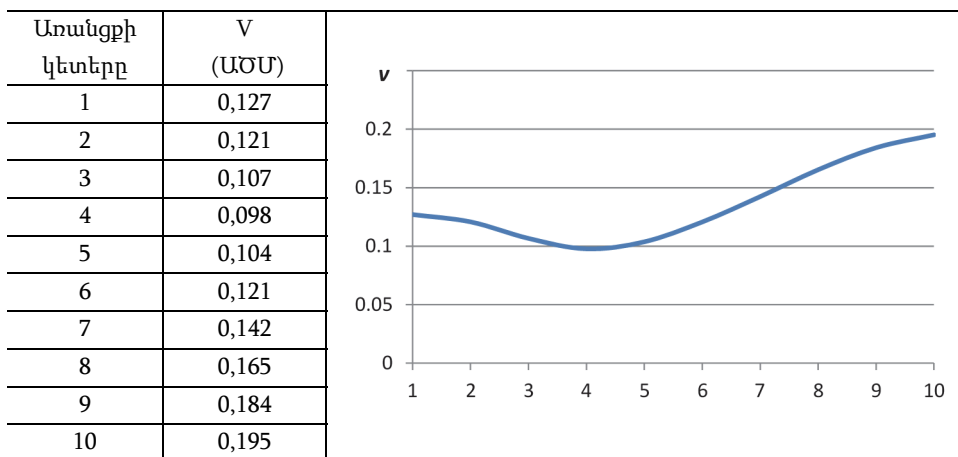
Առանցքի կետերը	S, Mises, ՄՊա	S, S22, ՄՊա	σ_0 , Մպա	PEEQ	V (ԱԾՄ)	V (ՀԱՇ)
1	120	-194	-114	0,167	0,127	-0,064
2	123	-195	-113	0,194	0,121	-0,103
3	131	-195	-107	0,268	0,107	-0,187
4	142	-188	-93	0,355	0,098	-0,215
5	147	-176	-79	0,393	0,104	-0,169
6	141	-167	-73	0,362	0,121	-0,123
7	131	-159	-72	0,285	0,142	-0,060
8	124	-149	-67	0,191	0,165	0,037
9	120	-135	-55	0,107	0,184	0,126
10	119	-117	-38	0,049	0,195	0,177
Վերնի կետերը						
1	120	-194	-114	0,167	0,127	-0,064
2	119	-202	-123	0,180	0,122	-0,119
3	118	-221	-145	0,221	0,106	-0,300
4	140	-278	-190	0,396	0,064	-1,106
5	161	-230	-173	0,624	0,048	-1,689
6	139	-28	-39	0,705	0,065	-0,145
	139	-28	-39	0,053	0,207	0,178
7	118	22	29	0,041	0,204	0,214
8	118	-13	28	0,026	0,202	0,209
9	117	11	42	0,023	0,203	0,212
Եզրի կետերը						
1	117	11	42	0,023	0,203	0,212
2	117	10	40	0,027	0,203	0,213
3	117	14	41	0,034	0,204	0,217
4	117	16	42	0,039	0,205	0,220
5	118	7	37	0,041	0,204	0,218
6	119	-11	30	0,039	0,203	0,214
7	120	-35	18	0,037	0,201	0,208
8	121	-61	4	0,035	0,199	0,202
9	121	-84	-11	0,034	0,198	0,196
10	120	-103	-25	0,033	0,197	0,190

Նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիների տվյալները ցույց են տալիս, որ նյութի խտացման գործընթացը մամլամատի տակ հիմնականում իրականացվում է անհավասարաչափ (նկ. 6), և մամլամատի եզրին մոտ նյութի $v_0=0,2$ սկզբնական ծակոտկենության մեծությունը փոքրանալով դառնում է $v_{\min}=0,048$: Նշենք, որ նկ. 5 և 6-ում բերված նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիների տեսքերը նույնպես լավ համապատասխանում են նկ. 1-ի տվյալներին:



Նկ. 6. Մամլամատի տակ նմուշի հսկման տեղում նյութի V ընթացիկ ծակոտկենության տվյալները

Ուսումնասիրվել է նաև ծակոտկենության բաշխումը նմուշի կենտրոնական առանցքի ուղղությամբ: Առաջին 10 հանգույցների տվյալներով կառուցվել է V ծակոտկենությունների բաշխման գրաֆիկը (նկ. 7):



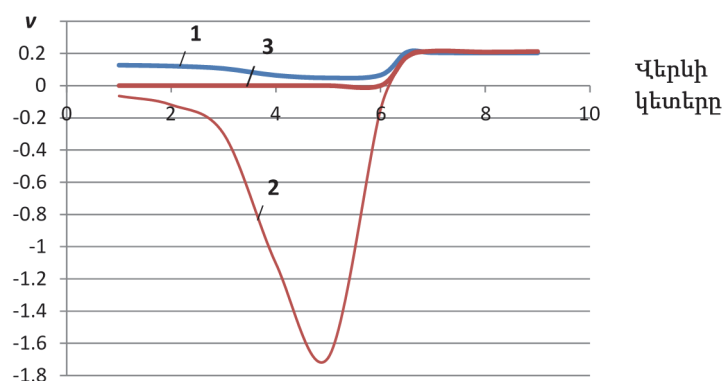
Նկ. 7. Նմուշի առանցքով նյութի V ընթացիկ ծակոտկենության բաշխման տվյալները

Այժմ քննարկենք վերլուծական մեթոդով ծակոտկենության հաշվառման առանձնահատկությունները: Դրա համար օգտագործվում է [4] – ի մեթոդը: Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության (ՄՆՊԴՏ) հավասարումների ընթացիկ V (ՀԱՇ) ծակոտկենության որոշման բանաձևն արտահայտվում է նյութի սկզբնական ծակոտկենությամբ՝ ν_0 , միջին σ_0 լարումով, $\mathcal{E}_i = \text{PEEQ}$ դեֆորմացումների ու σ_i լարումների ինտենսիվություններով և ունի հետևյալ տեսքը՝

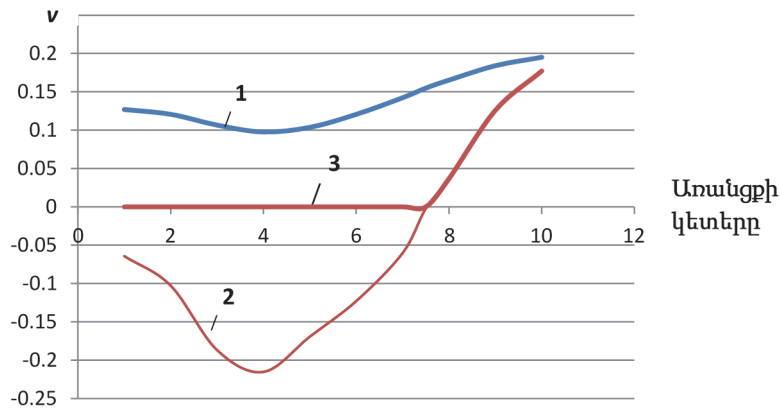
$$V(\text{ՀԱՇ}) = \nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp\left(-9\nu_0^m \sigma_0 \mathcal{E}_i / \sigma_i\right): \quad (1)$$

Օգտագործելով «ABAQUS» ԱՕՄ-ում լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների տվյալները՝ որոշվել են ընթացիկ V (ՀԱՇ) ծակոտկենության մեծությունները (աղ. 2), և դրանց հիման վրա կառուցվել են նկ. 8-10 –ի գրաֆիկները: Ընդ որում, 1-ով նշված կորերին համապատասխանում են V (ԱՕՄ) –ում որոշված տվյալները, իսկ 2-ով նշված բարակ գծերով բացասական արժեքներով կորերին՝ V (ՀԱՇ) –ի արդյունքները: Ինչ վերաբերում է 3 –րդ՝ հաստ գծերով զրո արժեքներով կորերին (V ԻՐԱԿԱՆ), ապա հաշվի է առնվել այն հանգամանքը, որ չի կարող լինել բացասական արժեքներով ծակոտկենություն: Այսինքն՝ ըստ ծակոտկենության որոշման (1) բանաձևի՝ այդ կետերում եռակալված նյութը ամբողջապես խտացել է:

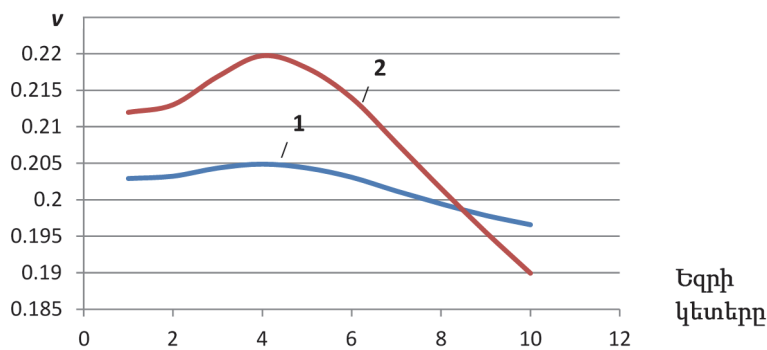
Նշենք, որ V (ԱՕՄ)–ում և V (ՀԱՇ)–ով ծակոտկենության որոշման արդյունքները որակապես նկարագրում են եռակալված նյութի խտացման գործընթացը, այն դեպքում, երբ քանակական տվյալների միջև որոշ դեպքերում կան տարբերություններ: Դա բացատրվում է նյութերի սկզբնական տվյալների տարբերությամբ, որն անհրաժեշտ կլինի հետագայում ուսումնասիրել:



Նկ. 8. Մամլամատի տակ նմուշի հպման տեղում նյութի V ընթացիկ ծակոտկենության բաշխումը՝ ըստ ԱՕՄ-ի (1 կորը) և ըստ ծակոտկենության տեսական բանաձևի (2 և 3 կորերը)



Նկ. 9. Նմուշի առանցքի ուղղությամբ նյութի V ընթացիկ ծակոտկենության բաշխումը՝ ըստ ԱՕՄ-ի (1 կորը) և ըստ ծակոտկենության տեսական բանաձևի (2 և 3 կորերը)



Նկ. 10. Նմուշի եզրով նյութի V ընթացիկ ծակոտկենության բաշխումը ըստ ԱՕՄ-ի (1 կորը) և ըստ ծակոտկենության տեսական բանաձևի (2 կորը)

Եզրակացություն

1. Հոծ և եռակալված նյութերից գլանական նմուշների բացարձակ կոշտ մամլամատով բաց միջասեղման գործընթացների մոդելավորումը և լարվածադեֆորմացիոն վիճակների հետազոտումն իրականացվում են ԱՕՄ-ում:

2. Հոծ նյութից պատրաստված գլանի դեպքում մամլամատի տակ նմուշի նյութի հավասար իջեցման համար օգտագործվում է շառավղի ուղղությամբ երեք տարբեր ճնշում հաղորդող երեք կոշտ գլանական մասերից բաղկացած մամլամատ: Ընդ որում, քննարկվել են միայն առաջին պլաստիկ դեֆորմացման առաջացման արդյունքները, և դրանք բավականին լավ համընկնում են գրականությունում նշված տվյալների հետ:

3. Եռակալված նյութից գլանի դեպքում նմուշի հավասար իջեցումն ապահովվում է մամլամատի տակ նյութի համապատասխան կետերի առանցքի ուղղությամբ հավասար տեղափոխությամբ: Գլանի բավականին մեծ պլաստիկ դեֆոր-

մացման դեպքի լարվածադեֆորմացիոն վիճակների հետազոտման հետ միասին ուսումնասիրվում են նաև նյութի V(ԱՕՄ) ծակոտկենության բաշխման գոտիները:

4. Օգտագործելով ԾՆՊՂՏ հավասարումների ընթացիկ V(ՀԱՇ) ծակոտկենության որոշման բանաձևը՝ հաշվարկվել են դեֆորմացված եռակալված նյութերից գլանի ընթացիկ ծակոտկենության մեծությունները: Ցույց է տրվել, որ V(ԱՕՄ)-ում V ՀԱՇ-ով ծակոտկենության որոշման արդյունքները որակապես նկարագրում են եռակալված նյութի խտացման գործընթացը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988.-153с.
2. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1971. -421 с.
3. **Петросян Г.Л., Мусаелян Г.В.** Исследование влияния схемы деформирования на уплотняемость спеченных цилиндрических заготовок // Известия вузов. Машиностроение.- 1983. - N10.- С. 102-105.
4. **Պետրոսյան Գ.Լ., Խաչատրյան Հ.Հ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մարգարյան Մ.Ա.** Կոնական մամլամայրում գլանական եռակալված ձողի հակաճնշմամբ մամլման գործընթացի «ABAQUS»-ով մոդելավորումը // ՀԱՊՀ ԼՐԱԲԵՐ. Գիտական հոդվածների ժառանգություն. - Երևան: Ճարտարագետ, 2015. – Մաս 2. – Էջ 295-301:
5. **Петросян Г.Л., Петросян А.С. Левонян Г.Л.** Усовершенствование инженерного метода использования формулы для определения пористости спеченных материалов // Материалы секции “Наука и технологии будущего” Международного конгресса, посвященного 160-летию со дня рождения выдающегося русского инженера В.Г. Шухова, 17-18 апреля 2014 года. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.- С. 211-217.
6. Моделирование процесса прессования круглого стержня в конической матрице в условиях больших противодавлений / **Г.Л. Петросян, Г.Г. Хачатрян, М.Б. Сафарян и др.** // Вестник НПУА: Механика, машиноведение, машиностроение.- 2015 - N1. - С. 26-35.
7. **Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.** Механика пластических деформаций при обработке металлов. - М.: Машиностроение, 1969. - 504с.

ՀԱՊՀ, Մեխանիկամեքենաշինական, տրանսպորտային համակարգերի և դիզայնի ինստիտուտ: Նյութը ներկայացվել է տպագրության 15.04.2017:

Г.Л. ПЕТРОСЯН, М.А. МАРГАРЯН, Г.А. ГАЛОЯН

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТОЙ ПРОШИВКИ
СПЛОШНОГО И СПЕЧЕННОГО ОБРАЗЦОВ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ**

Проведено моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния открытой прошивки цилиндрических образцов из сплошного и спеченного материалов в автоматизированной программной среде, когда под абсолютно жестким пуансоном происходит равное снижение материала образца. В случае цилиндра из сплошного материала это снижение осуществляется с использованием пуансона, который состоит из трех твердых цилиндрических частей, передающих по направлению радиуса три разных давления, при этом обсуждаются данные возникновения только первой пластической деформации. В случае цилиндра из спеченного материала равное снижение материала образца под пуансоном обеспечивается равным перемещением соответствующих точек материала по направлению оси образца. Путем исследования данных довольно большой пластической деформации цилиндра изучаются зоны распределения пористости материала.

Ключевые слова: сплошной и спеченный материалы, открытая прошивка цилиндра, напряженно-деформированное состояние, осесимметричная деформация, среднее напряжение, пористость.

G.L. PETROSYAN, M.A. MARGARYAN, H.A. GALOYAN

**COMPUTER MODELING OF THE OPEN BROACHING PROCESS OF THE
ROUND SECTION SOLID AND SINTERED SAMPLES**

Modeling and investigation of the stress-strain state of open broaching of solid and sintered cylindrical samples in an automatic program environment are carried out when under an absolutely rigid punch, an equal decrease of the sample material occurs. In the case of solid-material cylinder that decrease is implemented by using a punch which consists of three hard cylindrical parts which transmit three different pressures in the radial direction. At that, only the data on the emergence of the first plastic deformation are discussed. In the case of a cylinder from a sintered material, an equal reduction in the material of the sample under the punch is ensured by an equal displacement of the corresponding points of the material along the direction of the sample axis. At the same time, by studying the data on a rather large plastic deformation of the cylinder, the distribution zones of porosity of the material are also studied.

Keywords: solid and sintered material, open broaching of cylinder, stress-strain state, axis-symmetric deformation, average stress, porosity.

А.А. СААКЯН

ВЛИЯНИЕ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОРЫ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ СЖАТОГО СТЕРЖНЯ

Рассматривается задача устойчивости прямолинейного стержня, закрепленного на одном конце и сжимаемого на другом конце центральной осевой нагрузкой, при наличии дополнительной опоры. Рассмотрены три случая закрепления конца стержня: шарнирное, жесткое и скользящее, а также случаи как консервативной силы, так и следящей силы. Получены зависимости критической сжимающей нагрузки от места расположения дополнительной опоры.

Ключевые слова: стержень, устойчивость, промежуточная опора, консервативная сила, следящая сила.

Введение. Задача устойчивости центрально-сжатого упругого стержня была сформулирована и решена еще в XVIII веке Л. Эйлером. Однако до настоящего времени интерес к этой, кажется, простой задаче не ослабевает ввиду широкой ее распространенности как в инженерных конструкциях, так и в природе [1-5]. Задачи оптимизации устойчивости сжатого упругого стержня по критерию минимального веса исследованы достаточно полно [6]. Из исследований, относящихся к задачам оптимизации на основе определения места расположения опоры, можно указать работы [7,8]. В [9] решена задача устойчивости закрепленного по концам двухкомпонентного составного стержня под действием осевой сосредоточенной силы, приложенной в точке раздела материалов, и выявлена зависимость величины критической силы от отношения изгибных жесткостей составных частей стержня.

В настоящей работе проводится исследование характера изменения величины критической нагрузки в зависимости от места расположения опоры. Установлено, что задача не имеет оптимального решения.

Постановка задачи. Пусть стержень постоянного поперечного сечения, закрепленный на одном конце, сжат силой P . Предполагается возможность установки точечной опоры, ограничивающей поперечное смещение стержня в этой точке (рис. 1).



Рис.1. Схематическое представление задачи

При заданной длине стержня l требуется определить место расположения опоры, т.е. найти множитель $0 < \delta < 1$, при котором критическая нагрузка, приводящая к потере устойчивости, будет наибольшей.

Уравнение устойчивости для каждой из частей стержня имеет вид [10]

$$\frac{d^4 w_i}{dx^4} + \alpha^2 \frac{d^2 w_i}{dx^2} = 0 \quad (i=1,2), \quad \alpha^2 = \frac{P}{EJ}, \quad (1)$$

где w_1 – поперечное перемещение (прогиб) на отрезке $0 \leq x \leq \delta l$, а w_2 – то же, на отрезке $\delta l \leq x \leq l$; P – сжимающая нагрузка; E – модуль упругости материала стержня; J – момент инерции поперечного сечения относительно оси Ox .

Предполагается, что на опоре, т.е. в точке раздела $x = \delta l$ частей стержня, выполняются условия равенства нулю прогиба с обеих сторон, а также условия равенства между собой углов поворота и изгибающих моментов:

$$w_1 = 0, \quad w_2 = 0, \quad \frac{dw_1}{dx} = \frac{dw_2}{dx}, \quad \frac{d^2 w_1}{dx^2} = \frac{d^2 w_2}{dx^2} \quad (x = \delta l). \quad (2)$$

Общее решение уравнения (1), очевидно, имеет вид

$$w_i = A_i + B_i x + C_i \sin \alpha x + D_i \cos \alpha x \quad (i=1,2).$$

Шарнирное закрепление. Удовлетворяя условиям шарнирного закрепления конца $x = 0$:

$$w_1 = 0, \quad \frac{d^2 w_1}{dx^2} = 0 \quad (x = 0)$$

и условиям непрерывности (2), будем иметь

$$w_1 = C_1 \left(\sin \alpha x - \frac{x}{\delta l} \sin \alpha \delta l \right), \quad (3)$$

$$w_2 = \frac{(C_1 - C_2)}{\cos \alpha \delta l} [\sin \alpha \delta l \cos \alpha x - \alpha \delta l + \alpha x] - \frac{x}{\delta l} C_1 \sin \alpha \delta l + C_2 \sin \alpha x.$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 подлежат определению из граничных условий на конце $x = l$. Поскольку этот конец свободен относительно перемещений и подвержен действию лишь осевой нагрузки, то имеем условия на изгибающий момент и перерезывающую силу:

$$\frac{d^2 w_2}{dx^2} = 0; \quad \frac{d^3 w_2}{dx^3} + \kappa \frac{dw_2}{dx} = 0 \quad (x = l). \quad (4)$$

При $\kappa = \alpha^2$ будем иметь случай консервативной нагрузки, а при $\kappa = 0$ - случай следящей нагрузки.

Подставляя второе из представлений (3) в условия (4), получим однородную систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha l C_1 - (\operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha l - \sin \alpha l) C_2 = 0, \\ & C_1 \left\{ (\alpha^2 - \kappa) \operatorname{tg} \alpha \delta l \sin \alpha l + \kappa \left[\frac{1}{\cos \alpha \delta l} - \frac{\sin \alpha \delta l}{\alpha \delta l} \right] \right\} + \\ & + C_2 \left\{ -(\alpha^2 - \kappa) (\operatorname{tg} \alpha \delta l \sin \alpha l + \cos \alpha l) - \frac{\kappa}{\cos \alpha \delta l} \right\} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Приравняв детерминант матрицы системы (5) к нулю, получим следующее трансцендентное уравнение для определения критической нагрузки, приводящей к потере устойчивости, в зависимости от места расположения опоры:

$$-(\alpha^2 - \kappa) \operatorname{tg} \alpha \delta l + \kappa \frac{\sin \alpha \delta l \sin \alpha (1 - \delta) l - \alpha \delta l \sin \alpha l}{\alpha \delta l \cos \alpha \delta l} = 0. \quad (6)$$

В случае консервативной нагрузки ($\kappa = \alpha^2$) уравнение (6) примет вид

$$\alpha \delta l \sin \alpha l - \sin \alpha \delta l \sin \alpha (1 - \delta) l = 0, \quad (7)$$

а в случае следящей нагрузки ($\kappa = 0$):

$$\operatorname{tg} \alpha \delta l = 0. \quad (8)$$

Жесткое защемление. Удовлетворяя условиям жесткого защемления конца $x=0$:

$$w_1 = 0, \quad \frac{dw_1}{dx} = 0 \quad (x=0) \quad (9)$$

и условиям непрерывности (2), будем иметь

$$\begin{aligned} w_1 &= C_1 \left[(\alpha \delta l - \sin \alpha \delta l) \frac{1 - \cos \alpha x}{1 - \cos \alpha \delta l} - \alpha x + \sin \alpha x \right], \\ w_2 &= C_2 \left\{ \frac{\alpha (\delta l - \alpha x)}{\cos \alpha \delta l} + \sin \alpha x - \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha x \right\} + \\ &+ C_1 \left\{ -\frac{\alpha \delta l}{\cos \alpha \delta l} + \frac{(\alpha \delta l - \sin \alpha \delta l)}{1 - \cos \alpha \delta l} + \alpha x \frac{1 - \cos \alpha \delta l}{\cos \alpha \delta l} + \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{tg} \alpha \delta l \frac{(1 - \alpha \delta l \operatorname{ctg} \alpha \delta l)}{1 - \cos \alpha \delta l} \cos \alpha x \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Удовлетворяя вторым из представлений (10) условиям (4), получим однородную систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} C_1 \frac{(\alpha \delta l - \operatorname{tg} \alpha \delta l)}{1 - \cos \alpha \delta l} \cos \alpha l + C_2 (-\sin \alpha l + \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha l) &= 0, \\ C_1 \left\{ \alpha \kappa \frac{1 - \cos \alpha \delta l}{\cos \alpha \delta l} + \alpha (\kappa - \alpha^2) \frac{\alpha \delta l - \operatorname{tg} \alpha \delta l}{1 - \cos \alpha \delta l} \sin \alpha l \right\} + \\ + C_2 \left\{ -\frac{\alpha \kappa}{\cos \alpha \delta l} + \alpha (\kappa - \alpha^2) (\cos \alpha l + \operatorname{tg} \alpha \delta l \sin \alpha l) \right\} &= 0. \end{aligned}$$

Приравняв детерминант матрицы последней системы к нулю, получим следующее трансцендентное уравнение:

$$\begin{aligned} \kappa [-2\alpha \delta l \cos \alpha l + 3 \sin \alpha l + \sin \alpha (1 - 2\delta)l - 4 \sin \alpha (1 - \delta)l] + \\ + 2(\kappa - \alpha^2) [\alpha \delta l \cos \alpha \delta l - \sin \alpha \delta l] = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

В случае консервативной нагрузки ($\kappa = \alpha^2$) уравнение (11) примет вид

$$-2\alpha \delta l \cos \alpha l + 3 \sin \alpha l + \sin \alpha (1 - 2\delta)l - 4 \sin \alpha (1 - \delta)l = 0, \quad (12)$$

а в случае следящей нагрузки ($\kappa = 0$):

$$\alpha \delta l \cos \alpha \delta l - \sin \alpha \delta l = 0. \quad (13)$$

Скользкая заделка. Удовлетворяя условиям скользящей заделки конца $x = 0$:

$$\frac{d^3 w_1}{dx^3} = 0, \quad \frac{dw_1}{dx} = 0 \quad (x = 0)$$

и условиям непрерывности (2), будем иметь

$$\begin{aligned} w_1 &= C_1 (\alpha \delta l - \alpha x - \sin \alpha \delta l + \sin \alpha x), \\ w_2 &= C_1 \left\{ -\frac{1 - \cos \alpha \delta l}{\cos \alpha \delta l} (\alpha \delta l - \alpha x) - \sin \alpha \delta l + \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha x \right\} + \\ &+ C_2 \left\{ \frac{1}{\cos \alpha \delta l} (\alpha \delta l - \alpha x) + \sin \alpha x - \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha x \right\}. \end{aligned}$$

Удовлетворяя условиям (4), будем иметь

$$\begin{aligned} C_1 \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha l + C_2 \{ \sin \alpha l - \operatorname{tg} \alpha \delta l \cos \alpha l \} = 0, \\ C_1 \left\{ (\alpha^2 - \kappa) \operatorname{tg} \alpha \delta l \sin \alpha l + \kappa \frac{1 - \cos \alpha \delta l}{\cos \alpha \delta l} \right\} - \\ - C_2 \left\{ (\alpha^2 - \kappa) (\cos \alpha l + \operatorname{tg} \alpha \delta l \sin \alpha l) + \kappa \frac{1}{\cos \alpha \delta l} \right\} = 0. \end{aligned}$$

Приравняв определитель матрицы к нулю, получим

$$(\alpha^2 - \kappa) \sin \alpha \delta l + \kappa \{ \sin \alpha l - \sin \alpha (1 - \delta) l \} = 0.$$

При $\kappa = 0$ (следящая нагрузка) критическая нагрузка определяется из уравнения

$$\sin \alpha \delta l = 0 \quad (14)$$

и дается формулой

$$\alpha = \frac{\pi}{\delta l}.$$

При $\kappa = \alpha^2$ (консервативная нагрузка) критическая нагрузка определяется из уравнения

$$\sin \alpha l - \sin \alpha (1 - \delta) l = 0 \quad (15)$$

и дается формулой

$$\alpha = \frac{\pi}{l(2 - \delta)}.$$

Численный анализ. Учитывая обозначение в (1), численный анализ и выводы будут делаться относительно параметра α , называя его при этом критической нагрузкой.

Рассмотрим крайние положения опоры. Пусть опора вплотную подходит к закрепленному концу стержня ($\delta \rightarrow 0$). Тогда, независимо от вида закрепления этого конца, будем иметь задачу устойчивости стержня с жестко закрепленным концом, критическая консервативная нагрузка для которой известна [10] и равна

$$\alpha = \frac{\pi}{2l}. \quad (16)$$

Анализируя поведение уравнений (7), (12) и (15) при $\delta \rightarrow 0$, нетрудно найти, что все эти три уравнения переходят в уравнение $\cos \alpha l = 0$, решением которого является (16). Для следящей нагрузки уравнения (8), (13) и (14) дают только нулевое решение.

В случае расположения опоры на свободном конце стержня ($\delta \rightarrow 1$) понятия “консервативная нагрузка” и “следящая нагрузка”, очевидно, совпадают, из уравнений (7) и (8), а также (14) и (15) получаем уравнение $\sin \alpha l = 0$, решением которого является $\alpha = \frac{\pi}{l}$, совпадающее с известным [10] результатом для шарнирно опертого по концам стержня.

Из уравнений же (12) и (13) получим уравнение

$$\alpha l \cos \alpha l - \sin \alpha l = 0,$$

решением которого является

$$\alpha = \frac{4.493409457\dots}{l} \approx \frac{\pi}{0.7l},$$

совпадающее с известным результатом [10] для стержня, жестко закрепленного на одном конце и шарнирно опертого на другом.

При промежуточных расположениях опоры зависимости критической консервативной нагрузки от расположения опоры представлены на рис.2. Индексом “1” отмечен график зависимости для шарнирно опертого конца, индексом “2” - для защемленного края, а индексом “3” - для скользяще заделанного края.

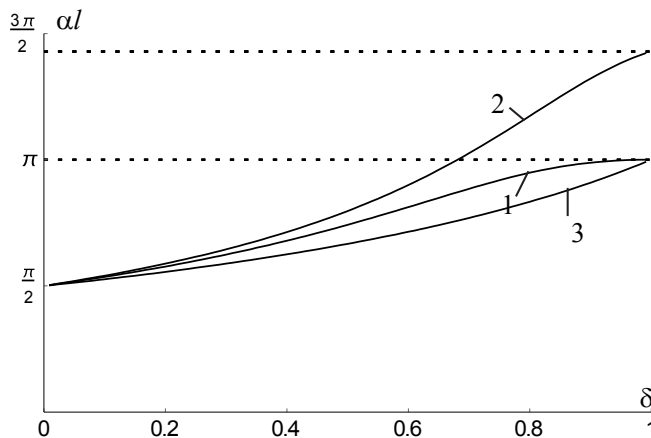


Рис. 2. Кривые зависимости критической нагрузки от места расположения опоры при разных условиях закрепления конца стержня

Для следящей нагрузки зависимости критической нагрузки от расположения опоры представляются аналитически:

$$\alpha l = \frac{\pi}{\delta} \quad - \text{ для шарнирно закрепленного конца и скользящей заделки;}$$

$$\alpha l = 4.493409457... \approx \frac{\pi}{0.7\delta} \quad - \text{ для защемленного конца.}$$

Очевидно, что в последних формулах уменьшение δ ограничивается условием прочности стержня

$$\sigma = \frac{P}{S} < [\sigma],$$

где S - площадь поперечного сечения; $[\sigma]$ - допускаемое напряжение на сжатие.

Закключение. Исследовано влияние промежуточной точечной опоры на величину критического усилия, вызывающего потерю устойчивости центрально-сжатого упругого стержня, при различных условиях закрепления одного его конца. Показано, что при расположении опоры близко к свободному концу стержня даже при следящей нагрузке возможна потеря устойчивости, причем величина критической следящей нагрузки всегда превосходит критическую консервативную нагрузку. Показано также, что при любом месте расположения опоры критическая консервативная нагрузка для стержня с защемленным концом превосходит подобное значение для стержня с шарнирно закрепленным концом, а последнее превосходит значение для стержня со скользяще заделанным концом.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю профессору М.В. Белубеяну за постановку задачи и ценные указания при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shan W. and Chen Z.** Mechanical instability of thin elastic rods // Journal of Postdoctoral Research. – 2013. – Vol.1, No. 2. – P. 1-8.
2. Microtubules can bear enhanced compressive loads in living cells because of lateral reinforcement /**C.P. Brangwynne, L. Mahadevan, S. Kumar, et al**// JCB, The Journal of Cell Biology. – 2006, Jun 5.- 173(5). – P.733-741.
3. **Xu F., Lu W., Zhu Y.** Controlled 3D Buckling of Silicon Nanowires for Stretchable Electronics // ACS Nano. – 2011.– 5 (1).– P. 672–678.
4. **Liu Y., Xue Y.** Some Aspects of Research on Mechanics of Thin Elastic Rod // The 4th Symposium on the Mechanics of Slender Structures (MoSS2013): Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 448, 012001 – doi:10.1088/1742-6596/448/1/012001.

5. Kolomiets L., Orobey V., Lymarenko A. Non-conservative problems of the stability of bar structures // Tech. Journal.- Hrcak, Croatia, 2015. – Vol.9, No3. – P. 311-316.
6. Баничук Н.В. Оптимизация форм упругих тел. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
7. Гнуни В.Ц. Оптимальный выбор расположения опор в задачах изгиба, колебаний и устойчивости упругой балки // В сб.: Вопросы оптимального управления, устойчивости и прочности механических систем. – Ереван: Изд. ЕГУ, 1997. – С.115-120.
8. Гнуни В.Ц., Элоян А.В. Оптимальный выбор расположения опор в задаче изгиба прямоугольной пластинки // Изв. НАН РА. Механика. –2001. – Т.54, №3. – С.14-17.
9. Lee G.E., Reissner E. Note on a problem of beam buckling // Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP).– 1975. – 26.–P. 839.–doi:10.1007/BF01596086
10. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем.– М.: Наука, 1967.– 984 с.

Институт механики НАН РА. Материал поступил в редакцию 05.02.2017.

Ա.Ա. ՄԱՀԱԿՅԱՆ

ՀԵՆԱՐԱՆԻ ԴԻՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ՏԵՂԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԵՂՄՎԱԾ ՁՈՂԻ ԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԻ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Հետազոտվել է մեկ ծայրով ամրակցված և մյուս ծայրից կենտրոնական առանցքային բեռով սեղմվող ուղղաձիգ ձողի կայունության խնդիրը, երբ առկա է լրացուցիչ միջանկյալ հենարան: Դիտարկվել են ամրակցման երեք տարբեր պայմաններ՝ հողակապ, կոշտ ամրացում և սահող ամրացում, ինչպես նաև տարբեր բեռներ՝ կոնսերվատիվ և հետևող: Ստացվել են սեղմող կրիտիկական բեռի կախվածությունները լրացուցիչ հենարանի դիրքավորման տեղից:

Առանցքային բեռեր. ձող, կայունություն, միջանկյալ հենարան, կոնսերվատիվ ուժ, հետևող ուժ:

A.A. SAHAKYAN

THE INFLUENCE OF THE SUPPORT LOCATION ON THE VALUE OF CRITICAL LOAD OF THE COMPRESSED BAR

The stability problem of a straight bar with one fixed end, and compressed by a central axial load at the other end at an additional support is considered. Three cases of end-fixing: swivel support, fully fixed and slide bush, as well as different loads: conservative and follower are considered. The dependences of the critical compressive load on the location of additional support are obtained.

Keywords: bar, stability, intermediate support, conservative force, follower force.

Ա.Ղ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԿԼՈՐ ՀԱՏՈՒՅԹՈՎ ՓՈՐՁԱՆՄՈՒՇԻ ՄԵՂՄՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԻ ՊԼԱՍՏԻԿՈՒԹՅԱՆ ՀՈՍՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ՏԵՍՈՒԹՅԱՄԲ

Օգտագործվել են ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության հոսունության տեսության ծակոտկենության որոշման և կլոր հատույթով փորձանմուշի ճակատներում շփման սահքի դեպքում հպակային նորմալ ճնշման չափում չունեցող բանաձևերը: EXCEL ծրագրային միջավայրում կատարված թվային հաշվարկների հիման վրա որոշվել են ծակոտկենության աճի, ինչպես նաև ծակոտկենության արժեքները լայնական հատույթի տարբեր կետերում, և դրանք համեմատվել են ծակոտկեն նյութի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսությամբ ստացված տվյալների հետ:

Առանցքային բառեր. գլանական փորձանմուշ, եռակալված նյութ, նստեցում, հպակային նորմալ ճնշում, սահք, ծակոտկենություն:

Ներկայումս հոծ, եռակալված և չեռակալված փոշենյութերի ճնշմամբ մշակմամբ ստացվում են տնտեսության տարբեր բնագավառներում օգտագործվող մեխանիկական և շահագործական բարձր հատկություններ ունեցող առարկաներ և մեքենամասեր [1,2]: Հայտնի է, որ ծակոտկեն նյութերի հիմնական փորձարկման մեթոդը կլոր հատույթով փորձանմուշների սեղմման փորձարկումն է: Այն հնարավորություն է տալիս որոշել եռակալված նյութի իրական մեխանիկական հատկությունները՝ նյութի ծակոտկենության պարամետրերը, և կառուցել դրա դեֆորմացման գրաֆիկը [3]:

[4]-ում կլոր հատույթով փորձանմուշի հպակային մակերևույթներում շփման տարբեր դեպքերում նստեցման գործընթացի [1,2] լարվածադեֆորմացիոն վիճակը հետազոտվել է փորձարկման տարբեր գործոնների հաշվառմամբ՝ ըստ դրա դեֆորմացման աստիճանի, չափերի և ծակոտկենության: Փորձանմուշի ճակատներում՝ արտաքինում սահքի շփումը ու կենտրոնում կայունը համակցելով՝ ստացվել է տարբեր նյութերի համար կիրառելի հպակային նորմալ ճնշման չափում չունեցող բանաձև:

Եռակալված փորձանմուշի ծակոտկենության փոփոխման արժեքների որոշման համար օգտագործվել է ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն մոտավոր տեսության համաձայն ծակոտկենության որոշման բավականին պարզ բանաձև [3], որում արտացոլված է նյութի սկզբնական ծակոտկենությունը: Ուստի ստացված արդյունքները մոտավոր են: Նշենք, որ [2]-ում Wolfram Mathematica

ծրագրային միջավայրում կատարված թվային հաշվարկների հիման վրա որոշվել են հպակային ճնշման և ծակոտկենության արժեքները լայնական հատույթի տարբեր կետերում:

Այսպիսով, եռակալված փոշենյութերում ծակոտկենության և հպակային մակերեսներում շփման առկայության պարագայում այդ հարցերը գլանական փորձանմուշների սեղմման դեպքում լիովին հետազոտված չեն: Հետևաբար, նյութի ծակոտկենության հաշվառմամբ կլոր հատույթով փորձանմուշների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի հետազոտումը՝ դրանց հպակային մակերևույթների վրա սահքի շփման ազդեցության դեպքում, օգտագործելով ավելի ճշգրիտ պլաստիկության տեսություն, հիմնավորում է տվյալ աշխատանքի արդիականությունը:

Աշխատանքի նպատակը կլոր հատույթով եռակալված փորձանմուշի առանցքային սեղմման գործընթացի, հպակային մակերևույթների վրա սահքի դեպքում, հետազոտումն է՝ ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության հոսունության տեսության (ՄՆՊՀՏ) հիման վրա:

Խնդիրը լուծվում է հետևյալ հաջորդականությամբ.

1. Դիտարկվել է d_0 և H_0 չափերով գլանային փորձանմուշի նստեցման խնդիրը՝ F սեղմող ուժի դեպքում, երբ դեֆորմացումից հետո դրանք դարձել են d և H : Խնդրի լուծումն իրականացվում է [5]–ի մեթոդով՝ իդեալական կոշտ – պլաստիկ նյութի համար հպակային մակերեսներում սահքի շփման առկայության դեպքում ընդունելով շրջանային ε_θ և շառավղային ε_r դեֆորմացումների հավասարությունը, ինչից հետևում է նաև σ_θ շրջանային և σ_r շառավղային լարումների հավասարությունը՝

$$\sigma_r = \sigma_\theta:$$

Ընդունվում է, որ սահքի շփման առկայության դեպքում փորձանմուշի հպակային մակերեսների վրա առաջանում են, նորմալ լարումների համեմատ, փոքր $\tau_{ry} = q$ շոշափող լարումներ: Այդ դեպքում դեֆորմացիոն և լարվածային վիճակների բաղադրիչները՝ գլխավոր լարումներով և դեֆորմացումներով արտահայտված, հետևյալն են.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon/2, \varepsilon_3 = \varepsilon_y = -\varepsilon, \\ \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r = \sigma_\theta \neq 0, \sigma_3 = \sigma_y = -p, \end{aligned} \quad (1)$$

որտեղ $\sigma_y = -p$ –ն փորձանմուշի առանցքի նկատմամբ հպակային նորմալ ճնշումն է:

Նշենք, որ (1)–ով դեֆորմացումների ստացման համար օգտագործվել է նյութի ծավալի անփոփոխ մնալու պայմանը: Այդ տվյալներով որոշվող դեֆորմացումների ε_i ինտենսիվության արժեքն է [1]՝

$$\varepsilon_i = \varepsilon: \quad (2)$$

(1) –ում բերված լարվածային վիճակի բաղադրիչները տեղադրելով σ_i լարումների ինտենսիվության [1] բանաձևի մեջ և գրելով Հուբեր-Միզեսի պլաստիկության պայմանը՝

$$\sigma_i = \sigma_h, \quad (3)$$

ինչը արտահայտվում է σ_r և σ_y -ով՝ $\sigma_r - \sigma_y = \sigma_h$, կամ (1)-ի համաձայն կստանանք.

$$\sigma_r + p = \sigma_h, \quad (4)$$

որտեղ σ_h -ն նյութի հոսունության սահմանի լարումն է:

2. Խնդիրը լուծելու համար օգտագործվում է գլանական փորձանմուշից անջատված տարրի հետևյալ հավասարակշռության հավասարումը [5].

$$d\sigma_r/dr = 2q/H,$$

որը (4) – ի հաշվառմամբ ընդունում է հետևյալ տեսքը՝

$$dp/dr = -2q/H: \quad (5)$$

(5) հավասարման լուծման համար անհրաժեշտ է նախօրոք ունենալ շոշափող $\tau_{ry} = q$ լարումների փոփոխման օրենքը: Խնդիրը լուծվում է սահքի գոտու համար՝ ընդունելով, որ հպակային մակերեսների վրա շոշափող լարումների q ինտենսիվությունը կախված է կոնտակտային p ճնշումից Կուլոնի օրենքով՝ $q = fp$ [5], որտեղ f – ը շփման գործակիցն է:

Այդ դեպքում (5) –ը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2f}{H} dr,$$

որն ինտեգրելով և օգտագործելով հետևյալ եզրային պայմանը, երբ $r = \frac{d}{2}$, $\sigma_r = 0$ կամ (4)-ի հիման վրա՝ $r = d/2$ $p = \sigma_h$, որոշվում են սահքի միջակայքում p –ն և դրա չափում չունեցող մեծությունը՝

$$p = \sigma_h \exp \left[\frac{2f}{H} (d/2 - r) \right], \bar{p} = \frac{p}{\sigma_h} = \exp \left[\frac{2f}{H} (d/2 - r) \right]:$$

Նշենք, որ գլանային նմուշի անսեղմելիության $H_0 d_0^2 = Hd^2$ պայմանից հետևում է՝ $d = d_0 \sqrt{H_0/H}$: Դա հնարավորություն է տալիս $\bar{p}$ - ի որոշման բանաձևը ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$\bar{p} = \frac{p}{\sigma_h} = \exp \left[f (H_0/H) \sqrt{H_0/H} (1 - 2r/d) / (H_0/d_0) \right], \quad (6)$$

ինչից երևում է փորձանմուշի սկզբնական չափերի՝ H_0/d_0 և նստեցման աստիճանի՝ H_0/H ազդեցությունը չափում չունեցող հպակային նորմալ ճնշման վրա:

3. Կլոր հատույթով նմուշի դեֆորմացման տարբեր աստիճաններում նյութի v_0 սկզբնական ծակոտկենության փոփոխության արժեքների համար օգտագործվում է ՄՆՊՀՏ-ն նյութի ծակոտկենության աճի որոշման հետևյալ բանաձևը [3].

$$dv = \frac{9v^m \sigma_0 \overline{d\varepsilon}_i}{(1-v)^{3n-1} \sigma_i}, \quad (7)$$

որտեղ $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ -ն միջին լարումն է, չամրացվող նյութի համար $\sigma_i = \sigma_n$, m և n -ը՝ ծակոտկենության պարամետրերը:

Հաշվի առնելով (1) առնչությունները և $\sigma_r + p = \sigma_n$ պլաստիկության պայմանը, $\overline{\sigma}_0$ - չափում չունեցող մեծությունը ներկայացվում է հետևյալ տեսքով՝

$$\overline{\sigma}_0 = (2\overline{\sigma}_r - \overline{p})/3 = 2/3 - \overline{p}: \quad (8)$$

Փորձանմուշի նստեցման $H_0/H = 1,1$ աստիճանի դեպքում՝ $\overline{\Delta\varepsilon}_i = \ln H_0/H = 0,1$: Հետևաբար, $\overline{\Delta\varepsilon}_i$ -ի տվյալ աճի դեպքում ծակոտկենության աճի համար (7)-ը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$\Delta v = \frac{9 v^m \overline{\sigma}_0 \overline{\Delta\varepsilon}_i}{(1-v)^{3n-1}}: \quad (9)$$

Խնդրի լուծման համար օգտագործում ենք նաև հետևյալ բանաձևը [3]՝

$$v_i = v_{i-1} + \Delta v_i: \quad (10)$$

Ինչպես տեսնում ենք, այս դեպքում Δv - ի արժեքը կախված է գլանի շառավղով փոփոխվող ընթացիկ ծակոտկենության և չափում չունեցող $\overline{p}$ ճնշման մեծություններից:

4. Թվային հաշվարկները կատարվել են EXCEL ծրագրային միջավայրում՝ ընդունելով փորձանմուշի հպակային մակերեսներում շփման գործակիցը՝ $f = 0,1$, նստեցման աստիճանը՝ $H_0/H = 1,1$ ($\overline{\Delta\varepsilon}_i = \ln H_0/H = 0,1$) և նյութի սկզբնական ծակոտկենությունը՝ $v_0 = 0,1$ -ի, երբ $n = 0,25$, $m = 1$ [3]: Խնդիրը լուծվել է $d_0 = 20$ մմ, $H_0 = 25$ մմ չափերով փորձանմուշի նստեցման հաջարդական դեպքերի համար, ընդունելով, որ յուրաքանչյուր նստեցում իրականացվել է $\overline{\Delta\varepsilon}_i = 0,1$ չափով: Օգտվելով նաև վերը բերված $d = d_0 \sqrt{H_0/H}$ և $H_i/H_{i+1} = 1,1$ բանաձևերից՝ ստացվել են համապատասխանաբար d , H չափսերը, ինչպես նաև դրանց համապատասխան հարաբերությունները, որոնք ներկայացված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Նմուշի չափերը դեֆորմացման հաջորդական
դեպքերից հետո, երբ $d_0=25$ մմ, $H_0=20$ մմ

H_i , մմ	d_i , մմ	H_i/d_i
22,73	20,98	1,083
20,66	22,01	0,939
18,78	23,08	0,814
17,07	24,21	0,705

(6), (8)-(10) բանաձևերով փորձանմուշի նստեցման յուրաքանչյուր աստիճանի դեպքում որոշվել են համապատասխանաբար $\bar{p}$ -ի, $\bar{\sigma}_0$ -ի, Δv -ի և v -ի արժեքները: Դրանց հաշվարկները կատարվել են $0 \leq r \leq d/2$ միջակայքում՝ $\Delta r = d/16$ քայլով, և ստացված տվյալները բերված են աղ. 2-ում:

Աղյուսակ 2

Գլանի շառավղով փոփոխվող անչափ $\bar{p}$ ճնշման, $\bar{\sigma}_0$ միջին լարման, Δv և v ծակոտկենության փոփոխման և և դրանց ընթացիկ արժեքները

$d_1=20,98$ մմ, $H_1=22,73$ մմ									
r	0	$d_1/16$	$d_1/8$	$3d_1/16$	$d_1/4$	$5d_1/16$	$3d_1/8$	$7d_1/16$	$d_1/2$
r, մմ	0	1,311	2,623	3,934	5,245	6,556	7,868	9,179	10,49
$\bar{p}$	1,097	1,084	1,072	1,059	1,047	1,035	1,023	1,012	1,00
$\bar{\sigma}_0$	-0,430	-0,417	-0,405	-0,393	-0,381	-0,369	-0,357	-0,345	-0,333
Δv	-0,038	-0,037	-0,036	-0,034	-0,033	-0,032	-0,031	-0,030	-0,029
v_1	0,062	0,063	0,064	0,066	0,067	0,068	0,069	0,070	0,071
$d_2=22,01$ մմ, $H_2=20,66$ մմ									
r	0	$d_1/16$	$d_1/8$	$3d_1/16$	$d_1/4$	$5d_1/16$	$3d_1/8$	$7d_1/16$	$d_1/2$
r, մմ	0	1,376	2,751	4,127	5,503	6,878	8,254	9,629	11,01
$\bar{p}$	1,112	1,098	1,083	1,069	1,055	1,041	1,027	1,013	1,00
$\bar{\sigma}_0$	-0,446	-0,431	-0,416	-0,402	-0,388	-0,374	-0,360	-0,347	-0,33
Δv	-0,025	-0,024	-0,024	-0,023	-0,023	-0,022	-0,021	-0,021	-0,02
v_2	0,038	0,039	0,041	0,042	0,044	0,045	0,047	0,048	0,05
$d_3=23,08$ մմ, $H_3=18,78$ մմ									
r	0	$d_1/16$	$d_1/8$	$3d_1/16$	$d_1/4$	$5d_1/16$	$3d_1/8$	$7d_1/16$	$d_1/2$
r, մմ	0	1,443	2,885	4,328	5,77	7,213	8,655	10,098	11,54
$\bar{p}$	1,131	1,114	1,097	1,080	1,063	1,047	1,031	1,015	1,00
$\bar{\sigma}_0$	-0,464	-0,447	-0,430	-0,413	-0,397	-0,381	-0,365	-0,349	-0,33
Δv	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,016	-0,015	-0,015	-0,015	-0,02
v_3	0,022	0,024	0,025	0,027	0,028	0,029	0,031	0,033	0,04

$d_4=24.21$ մմ, $H_4=17.07$ մմ									
r	0	$d_1/16$	$d_1/8$	$3d_1/16$	$d_1/4$	$5d_1/16$	$3d_1/8$	$7d_1/16$	$d_1/2$
$r, \text{ մմ}$	0	1,513	3,026	4,539	6,053	7,566	9,079	10,592	12,11
$\bar{p}$	1,152	1,132	1,112	1,093	1,073	1,055	1,036	1,018	1,00
$\bar{\sigma}_0$	-0,486	-0,465	-0,446	-0,426	-0,407	-0,388	-0,369	-0,351	-0,33
Δv	-0,0096	-0,0098	-0,01	-0,0102	-0,0103	-0,0104	-0,0104	-0,0105	-0,01
v_4	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,0196	0,021	0,023	0,03

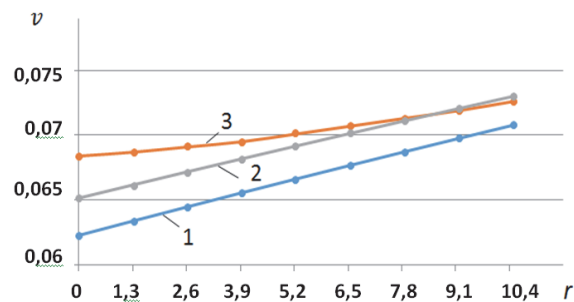
Նշենք, որ փորձանմուշի դեֆորմացման առաջին աստիճանի դեպքում (9) բանաձևում v -ն հաստատուն է (կախված չէ r -ից) և հավասար է նյութի v_0 սկզբնական ծակոտկենությանը: Ընդ որում, նմուշի ընթացիկ r շառավիղներին համապատասխան ընթացիկ v_i ծակոտկենությունները մեկը մյուսից տարբեր են և բավականին փոքրացել են: Դրանք հանդիսանալու են փորձանմուշի դեֆորմացման երկրորդ աստիճանի համար սկզբնական ծակոտկենություններ: Նույն հաշվարկային գործողությունները v_2, v_3 և v_4 ընթացիկ ծակոտկենությունների դեպքում կատարվում են նաև նմուշի դեֆորմացման մյուս աստիճանների համար:

Ստացված արդյունքների հիման վրա հնարավոր է կառուցել կլոր հատույթով փորձանմուշի նստեցման յուրաքանչյուր աստիճանից հետո ծակոտկենության բաշխման գրաֆիկները՝ դրա լայնական հատույթի տարբեր կետերում: Ինչպես երևում է աղյուսակից, յուրաքանչյուր դեֆորմացումից հետո ծակոտկենությունը նվազում է, մասնավորապես՝ փորձանմուշի կենտրոնում ընդունում է իր փոքրագույն արժեքը: Այդ արդյունքները համեմատվել են նաև ծակոտկեն նյութի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսությամբ ստացված տվյալների հետ [4]: Հաշվի առնելով, որ ծակոտկեն նյութի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության բանաձևով հաշվակները կատարված են որոշակի մոտավորությամբ, նույն մոտավորությամբ կատարվում է ևս մեկ հաշվարկ՝ ծակոտկեն նյութի պլաստիկության հոսունության տեսության ծակոտկենության որոշման բանաձևով: Ընդ որում, մոտավորությունն այն է, որ սկզբնական փոքր ($v_0 = 0,1$) ծակոտկենության և $2...4$ դեֆորմացման (նստեցման) աստիճաններում ծակոտկենության v_i ընթացիկ արժեքների դեպքում (9)-ի հայտարարը վերցված է 1-ին հավասար $((1 - v)^{3n-1} \approx 1)$: Ծակոտկենության տացված արժեքները ներկայացված են աղ. 3-ում:

*Ծակոտկենության արժեքները փորձանմուշի լայնական հատույթի տարբեր կետերում
դեֆորմացման առաջին աստիճանի դեպքում՝ հաշվարկված պլաստիկության
դեֆորմացիոն և հոսունության տեսություններով*

$r, մմ$	0	1,311	2,623	3,934	5,245	6,556	7,868	9,179	10,49
V ՄՆՊԴՏ	0,0694	0,0687	0,0691	0,0695	0,0701	0,0707	0,0713	0,0719	0,0726
V ՄՆՊՀՏ մոտավոր	0,0652	0,0662	0,0672	0,0682	0,0692	0,0702	0,0711	0,0721	0,073
V ՄՆՊՀՏ հիմնական	0,062	0,063	0,064	0,066	0,067	0,068	0,069	0,070	0,071

Վերը նկարագրված հաշվարկային գործողություններից հետո կառուցվել է նյութի ծակոտկենության բաշխման գրաֆիկը պլաստիկության դեֆորմացիոն և հոսունության տեսությունների հիման վրա: Նկարում նյութի ծակոտկենության բաշխման գրաֆիկներն են դեֆորմացման առաջին աստիճանի դեպքում. 1-ը՝ հաշվարկված ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության հոսունության տեսությամբ, 2-ը՝ կրկին պլաստիկության հոսունության տեսությամբ, սակայն [4]-ում նկարագրված մոտավոր մեթոդով, իսկ 3-ը՝ պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսությամբ:



*Նկ. Փորձանմուշի ընթացիկ v ծակոտկենության գրաֆիկները r շառավղից կախված՝
ճշգրիտ ու մոտավոր [4] պլաստիկության հոսունության (1, 2) և դեֆորմացիոն (3)
տեսություններով հաշվարկված*

1, 2 և 3 գրաֆիկների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ դրանց միջև առկա որոշ շեղումները բացատրվում են մոտավոր բանաձևերի կիրառմամբ:

Ստացված տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նմուշի դեֆորմացման 4 աստիճաններից հետո սկզբնական $v_0 = 0,1$ ծակոտկենությունը նվազել է մինչև 0,013, որը գտնվում է նմուշի լայնական հատույթի կենտրոնում:

Եզրակացություն: Եռակալված փորձանմուշի ծակոտկենության փոփոխման արժեքների որոշման համար օգտագործվել է ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության հոսունության տեսության ծակոտկենության որոշման բանաձևը: EXCEL ծրագրային միջավայրում թվային օրինակի լուծման հիման վրա որոշվել են նմուշի դեֆորմացիայի տարբեր աստիճաններում ծակոտկենության արժեքները, ինչպես նաև կառուցվել է լայնական հատույթում նյութի ծակոտկենության բաշխման գրաֆիկը: Կատարված հաշվարկները ցույց են տվել, որ.

1. Ծակոտկենության արժեքները անհավասարաչափ են բաշխված նմուշի շառավղով. կենտրոնում ծակոտկենության արժեքը ստացվում է նվազագույնը:

2. Թվային ինտեգրման գործընթացը շարունակելով՝ կարելի է նմուշի կենտրոնում ստանալ տարբեր շառավղներով նյութի անծակոտկեն գոտիներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
2. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. – 153 с.
4. **Петросян Г.Л., Азарян Л.А., Арустамян А.М., Карапетян А.К.** Исследование процесса осадки спеченного цилиндра при различных контактных условиях // Вестник ГИУА. Серия "Механика, машиноведение, машиностроение". - 2014. - Вып. 17, N2. – С. 32-41.
5. **Малинин Н.Н.** Технологические задачи пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1979. – 119 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է տպագրության 25.11.2016:

Ա.Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ КРУГЛОГО ОБРАЗЦА ПО ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Проведено исследование процесса осадки круглого сечения по теории пластичности течения пористого материала. Используются формула для определения пористости по теории пластичности течения пористых материалов и безразмерная формула для определения контактного нормального напряжения в случае трения скольжения на торцах образца. На основании численных расчетов, проведенных в программной среде MS Excel, определены значения приращения и величины пористости в различных точках поперечного сечения, которые были сопоставлены с данными, полученными на основе деформационной теории пластичности пористых материалов.

Ключевые слова: круглый образец, спеченный материал, осадка, контактное нормальное напряжение, скольжение, пористость.

A.GH. KARAPETYAN

**INVESTIGATING THE UPSETTING PROCESS OF A CYLINDRICAL SAMPLE
BY THE THEORY OF THE FLOW OF A POROUS MATERIAL PLASTICITY**

The dimensionless formula for determining the contact normal stress in the case of a friction slipping at the ends of the specimen and the formula for determining the growth (increment) and the value of the porosity by the theory of the flow of plasticity of porous materials are used. On the basis of numerical calculations carried out in the software environment MC Excel, the value of porosity at different points of the cross section are determined, which were compared with the data obtained on the basis of the deformation theory of plasticity of porous materials.

Keywords: cylindrical sample, sintered material, upsetting, contact normal stress, slipping, porosity.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ռ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

**ՊՂՆՁԻ ՀԻՄՔՈՎ ԴԻՍՊԵՐՍ ԿԱՐԾՐԱՑՈՂ ԵՎ ԱՄՐԱՑՎՈՂ
ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Ցույց է տրված, որ կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդների համար օգտագործվող փոշեկոմպոզիտային նյութերը պետք է լինեն պղնձի հիմքով, ընդ որում, մայրակի ամրացումը պետք է կատարվի դիսպերս մասնիկներով կարծրացման և դիսպերս հատիկներով ամրացման մեխանիզմներով՝ ջերմամշակմամբ, իսկ բարձր էլեկտրահաղորդականությունը, ջերմահաղորդականությունը և ջերմակայունությունն ապահովվեն շերտավոր կառուցվածքով կոմպոզիտային նյութերի օգտագործմամբ, որտեղ մակերևութային շերտի բարձր էլեկտրահաղորդականությունը և ջերմահաղորդականությունը պետք է ապահովի ցածր լեգիրված պղնձյա անծակոտկեն մարյակը, իսկ միջուկի բարձր մեխանիկական հատկությունները և ջերմակայունությունը՝ պղնձի հիմքով բարձր լեգիրված կոմպոզիտային անծակոտկեն կառուցվածքով նյութը, որոնց անծակոտկենության ապահովումը նպատակահարմար է իրականացնել տաք արտամղմամբ: Բացահայտվել է, որ տաք արտամղման դեպքում սահմանափակող գործոն է դառնում λ արտամղման գործակիցը, որի մեծանալով կտրուկ աճում են նյութի մեխանիկական հատկությունները: Ցույց է տրված, որ առավելագույն արժեքների դրանք հասնում են $\lambda = 4...5$ դեպքում: Հետազոտվել են 13%Ni+3%Al+1,0%Cr+0,8%Zr+Cu_{տե} բաղադրությամբ փոշեկոմպոզիտային նյութի կառուցվածքագոյացման մեխանիզմը և կինետիկան, տաք արտամղման դեպքում ընտրվել են օպտիմալ ռեժիմներ:

Առանցքային բառեր. փոշեկոմպոզիտային նյութ, մամլում, եռակալում, տաք արտամղում, դիսպերս կարծրացում, դիսպերս ամրացում, ջերմակայունություն, էլեկտրահաղորդականություն:

Ներածություն. Ժամանակակից տեխնիկայի զարգացմանը զուգընթաց՝ մեծ տեղ է հատկացվում հատկապես մետաղական հիմքով բարձրամուր և ֆունկցիոնալ նշանակությամբ կոմպոզիտային նյութերին (ԿՆ): Այս տեսակետից նշանակալից են պղնձի հիմքով կոմպոզիտային նյութերը, ինչպիսիք են դիսպերս մասնիկներով կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող պղնձյա փոշեհամաձուլվածքները, որոնց պահանջարկը շատ մեծ է արդի տեխնիկայում, հատկապես կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդների արտադրությունում [1]: Նշված արտադրատեսակներին ներկայացվող պահանջներն են բարձր էլեկտրահաղորդականություն և ջերմակայունությունը, որոնց ապահովման համար օգտագործվող նախապատրաստվածքները պետք է լինեն անծակոտկեն, և ցանկալի է՝ ունենան շերտավոր կառուցվածք, որում արտաքին շերտը կապահովի բարձր էլեկտրա-

հաղորդականություն, իսկ ներքին շերտը՝ բարձր ջերմակայունություն: Այսպիսի կառուցվածք գործնականում հնարավոր է ապահովել միայն փոշեմետալուրգիական եղանակներով, հատկապես շերտավոր մամլվածքների տաք արտամղման կամ ճնշմամբ մշակման միջոցով: Սակայն մինչև այժմ լիովին ուսումնասիրված չեն դիսպերս մասնիկներով (ֆազերով) կարծրացող և միաժամանակ դիսպերս հատիկներով ամրացվող փոշեկոմպոզիտային նյութերի տաք արտամղման տեսական և տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները: Եվ քանի որ փոշեմետալուրգիան խիստ հեռանկարային է Հայաստանի Հանրապետության համար, որտեղ առկա են մետաղական հումքի մեծ պաշարներ, հատկապես պղնձի, հետևապես՝ հետազոտվող խնդիրը նույնպես հեռանկարային է և տարբերվում է ավանդական եղանակներից:

Ելնելով վերը նշվածից՝ աշխատանքի նպատակն է հետազոտել դիսպերս մասնիկներով (ֆազերով) կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ ու ջերմակայունությամբ օժտված պղնձի հիմքով փոշեկոմպոզիտային նյութերի տաք արտամղման գործընթացը և ուսումնասիրել կառուցվածքագոյացման մեխանիզմը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Կատարվել է կոմպոզիտային նյութերի ստացմանը և կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորմանը նվիրված հայրենական և արտասահմանյան գրականության վերլուծություն [1-6], այդ թվում՝ դիսպերս մասնիկներով (ինտերմետաղական ֆազերով) կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող շերտավոր նյութերի համար: Վերլուծության են ենթարկվել կոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիաները [1, 7, 8], որի արդյունքում պարզվել է, որ բարձր կարծրությամբ, ամրությամբ, էլեկտրահաղորդականությամբ, ջերմահաղորդականությամբ և ջերմակայունությամբ օժտված համաձուլվածքները, որոնք կարող են կիրառվել կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդներ պատրաստելու համար, պետք է լինեն պղնձի հիմքով և ցանկալի է, որ բաղկացած լինեն մակերևութային շերտից ու միջուկից, որոնց մայրակի կարծրացումը և ամրացումը պետք է կատարվի ջերմամշակմամբ՝ դիսպերս մասնիկներով (ինտերմետաղական ֆազերով) կարծրացման և դիսպերս հատիկներով ամրացման մեխանիզմներով: Մակերևութային շերտի բարձր էլեկտրահաղորդականությունը և ջերմահաղորդականությունը պետք է ապահովի ցածր լեգիրված պղնձյա անձակոտկեն մարյակը, իսկ միջուկի բարձր ամրությունը, կարծրությունը և ջերմակայունությունը՝ պղնձի հիմքով բարձր լեգիրված կոմպոզիտային անձակոտկեն կառուցվածքով նյութը, որոնց կոմպակտավորումը նպատակահարմար է իրականացնել տաք արտամղմամբ: Ամրային բարձր արդյունավետության հասնելու համար անհրաժեշտ է ապահովել նաև ամուր կապ «արտաքին շերտ - միջուկ» անցումային շերտում՝ կոմպոզիտային նյութի ստացման գործընթացում: Նշված

խնդիրները կարող են լուծում գտնել միայն փոշեմետալուրգիական մեթոդներով, չնայած որ այստեղ ևս կան որոշակի դժվարություններ, հատկապես շերտավոր անծակոտկեն կոմպոզիտային նյութի ստացման գործընթացում՝ ապահովելու համար շերտերի հավասարաչափ հոսք տաք արտամղման ժամանակ: Աշխատանք [6]-ից հայտնի է, որ շերտավոր անծակոտկեն կոմպոզիտային նյութ ստանալու լավագույն մեթոդը տաք արտամղումն է, երբ եռակալումը և կառուցվածքի ձևավորումը համատեղվում են, և ապահովվում է անցումային շերտի բարձր ամրություն: Սակայն պղնձի հիմքով փոշեկոմպոզիտային նյութերի դեպքում այս ուղղությամբ հետազոտությունները քիչ են. չկա տաք արտամղման գործընթացի տեսական հիմնավորում, չեն ուսումնասիրվել հիմնական օրինաչափությունների մեխանիզմն ու խտացման կինետիկան, ինչպես նաև չի հետազոտվել շերտավոր կոմպոզիտային նյութում կառուցվածքազոյացման գործընթացը՝ կախված տաք արտամղման ռեժիմներից և դիսպերս մասնիկներով կարծրացնող ու դիսպերս հատիկներով ամրացնող ֆազերի պարամետրերից:

Հետազոտության արդյունքները. Ուսումնասիրվել են կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդների աշխատանքային պայմանները և դրանց բնութագրերը [1]: Ցույց է տրված, որ էլեկտրոդներին ներկայացվող հիմնական պահանջներն են՝ բարձր էլեկտրահաղորդականություն, լայն ջերմաստիճանային տիրույթում բարձր մեխանիկական հատկություններ, բավարար մաշակայունություն, բարձր ջերմահաղորդականություն, կոռոզիակայունություն, ջերմակայունություն, հրակայունություն և այլն: Կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդներից պահանջվող ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների և կառուցվածքի ուսումնասիրման արդյունքում ընտրվել և հիմնավորվել է նոր դասի փոշեհամաձուլվածք՝ պղնձի հիմքով դիսպերս մասնիկներով (ինտերմետաղական ֆազերով) կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող շերտավոր կոմպոզիտային նյութ, որը կարելի է ստանալ նախօրոք պատրաստված բովախառնուրդներից միջուկի և արտաքին շերտի (սնամեջ գլան) մամլման, դրանք մեկը մյուսի մեջ հավաքման, վերամամլման, տաքացման (եռակալման), տաք արտամղման և համապատասխան ջերմային մշակման միջոցով:

Որպես ելանյութեր օգտագործվել են ПМС-1 մակնիշի էլեկտրոլիտիկ պղնձի (ГОСТ 4960-75), ПХ1С մակնիշի քրոմի (ТУ 14-22-50-91), ПЛ1 մակնիշի ցիրկոնիումի (ТУ 48-42-51-73), ПНЭ-1 մակնիշի նիկելի (ГОСТ 9722-79) և АПС-1А մակնիշի ալյումինի (ГОСТ 10096-76) փոշիներ: Արտաքին շերտի բովախառնուրդից երկկոդմանի մամլմամբ պատրաստվել են սնամեջ գլանական ($D_{\text{в}}=29,5$ մմ, $D_{\text{н}}=21,5$ մմ, $H=50$ մմ, $\theta = 10, 15, 20, 25, 30\%$), իսկ միջուկի բովախառնուրդից՝ գլանական նմուշներ ($D_{\text{в}}=21$ մմ, $H=50$ մմ, $\theta = 10, 15, 20, 25, 30\%$), այնուհետև հավասար ծակոտկենությամբ մամլվածքներն իրար մեջ հավաքելուց, վերամամլումից

և ջրածնի միջավայրում $900...950^{\circ}C$ ջերմաստիճանում $1...1,5$ ժ եռակալելուց հետո ենթարկվել են տաք արտամղման մայրակի $2\alpha=110^{\circ}$ և $\lambda=4$ արտամղման գործակցով:

Տաք արտամղման գործընթացի հիմնավորման համար տեսական հիմք է հանդիսացել Գրինի կողմից առաջարկված ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության տեսությունը [9], որն իր հետագա զարգացումն է ստացել պրոֆեսոր Գ. Պետրոսյանի կողմից [10, 11]: Համաձայն այս տեսության՝

$$\sigma_{\text{էկվ}} = \frac{1}{\beta^{n+0.5}} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot S_{ij} \cdot S_{ij} + 9\alpha^m \sigma_0^2 \right)^{1/2},$$

$$d\bar{\varepsilon}_{\text{էկվ}} = \beta^{2n-0.5} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot de_{ij} \cdot de_{ij} + \frac{d\varepsilon_0^2}{\alpha^m} \right)^{1/2},$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3d\bar{\varepsilon}_{\text{էկվ}}}{\beta^{3n} 2\sigma_{\text{էկվ}}} \cdot [\sigma_{ij} - (1 - 2\alpha^m)\delta_{ij}\sigma_0],$$

$$d\theta = \frac{9 \cdot \alpha^m (1 - \theta) \cdot \sigma_0 \cdot d\bar{\varepsilon}_{\text{էկվ}}}{\beta^{3n} \cdot \sigma_{\text{էկվ}}},$$

որտեղ $\sigma_{\text{էկվ}}$ -ը համարժեք լարումն է, $d\bar{\varepsilon}_{\text{էկվ}}$ -ը՝ պլաստիկ դեֆորմացմանը համարժեք աճը, de_{ij} , $d\varepsilon_{ij}$, S_{ij} , σ_{ij} -ն՝ պլաստիկ դեֆորմացման և լարման դիստորսիաների և տենզորների կոմպոնենտների աճը, $\sigma_0=1/3\delta_{ij}\sigma_{ij}$ -ն՝ միջին լարումը, $d\varepsilon_0=1/3\delta_{ij}d\varepsilon_{ij}$ -ն՝ միջին դեֆորմացման աճը, δ_{ij} -ն՝ Կրոնեկերի սիմվոլը, n -ը և m -ը՝ θ հարաբերական ծակոտկենության պարամետրերը, α -ն և β -ն՝ ծակոտկենության ֆունկցիաները, որոնք որոշվել են հետևյալ բանաձևերով.

$$\alpha = \frac{1}{4} \left[\frac{3(1 - \theta^{1/3})}{(3 - 2\theta^{1/4}) \ln \theta} \right]^2, \quad \beta = \left[\frac{3(1 - \theta^{1/3})}{3 - 2\theta^{1/4}} \right]^2:$$

α -ի և β -ի որոշակի արժեքների դեպքում կարելի է ծակոտկեն նյութերի բանաձևերից անցում կատարել հոծ նյութերի պլաստիկության տեսությանը և տրված նյութի համար փորձնականորեն որոշել n և m պարամետրերը: n և m պարամետրերի որոշումը և դեֆորմացման դիագրամի կառուցումը կատարվել են վերը նշված բովախառնուրդներից պատրաստված ծակոտկեն գլանաձև նմուշի միառանցքային սեղմման փորձարկման արդյունքների հիման վրա: Այս դեպքում գլխավոր լարումը $\sigma_1=\sigma_2=0$, $\sigma_3=-\sigma$, ընդ որում՝ $\sigma=P/F$ առանցքային լարումն է (մամլման ճնշումը), իսկ P -ն և F -ը՝ նմուշի սեղմման ուժը և լայնակի կտրվածքի

մակերեսը: Հետևաբար, միառանցքանի լարվածային վիճակի դեպքում վերը նշված կախվածությունները կունենան հետևյալ տեսքը՝

$$\sigma_{\text{էլլ}} = K_1 \sigma; \quad d\bar{\varepsilon}_{\text{էլլ}} = K_2 d\varepsilon ,$$

$$d\theta = \frac{3 \cdot \alpha^m (1 - \theta)}{1 + \alpha^m} \alpha \cdot \varepsilon ,$$

$$K_1 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^m}}{\beta^{n+0.5}}; \quad K_2 = \frac{\beta^{2n-0.5}}{\sqrt{1 + \alpha^m}} ,$$

որտեղ $d\varepsilon$ -ն առանցքի ուղղությամբ պլաստիկ դեֆորմացման աճն է, $\varepsilon = \ln h_0/h$ -ը՝ առանցքի ուղղությամբ պլաստիկ դեֆորմացումը, h_0 -ն և h -ը՝ նախապատրաստվածքի սկզբնական և ընթացիկ բարձրությունը, իսկ k_1 և k_2 -ը՝ լարման և պլաստիկ դեֆորմացման աճին համարժեք գործակիցները:

Ստացված փորձնական արդյունքների տեսական հիմնավորման նպատակով կատարվել է անդրադարձ ծակոտկեն մարմնի պլաստիկության տեսության կախվածություններին: Բացառելով $d\bar{\Sigma}_{\text{էլլ}}$ -ը, կստանանք.

$$d\theta = \frac{6 \cdot \alpha^m (1 - \theta) \cdot \sigma_0}{\sigma_{ij} - (1 - 2\alpha^m) \cdot \delta_{ij} \cdot \sigma_0} \cdot d\varepsilon_{ij} :$$

Մյուս կողմից՝ կոշտ գլանաձև մամլամայրերում մամլման դեպքում (եռառանցքանի սեղմում, ε_θ շրջանային և ε_r շառավղային դեֆորմացումները բացակայում են, և նախապատրաստվածքի դեֆորմացված վիճակը բնութագրվում է առանցքային դեֆորմացման իրական չափով.

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} ,$$

որտեղ h -ը և h_0 -ն նախապատրաստվածքի ընթացիկ և սկզբնական բարձրություններն են: Ընդունենք, որ շփման ուժերը կոնտակտային մակերևույթներում բացակայում են, այսինքն՝ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = -\sigma$, և հաշվի առնելով, որ $d\varepsilon_\theta = d\varepsilon_r = 0$, կստանանք

$$\sigma_\theta = \sigma_r = -\frac{1 - 2\alpha^m}{1 + 4\alpha^m} \cdot \sigma ,$$

որտեղ σ -ն մամլման ճնշումն է:

Հետևաբար՝ $\sigma_{\text{էլլ}}$ համարժեք լարումը և պլաստիկ դեֆորմացման համարժեք աճը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$\sigma_{\text{էկվ}} = \frac{3\sigma}{\beta^{n+0.5}} \sqrt{\frac{\alpha^m}{1+4\cdot\alpha^m}},$$

$$d\varepsilon_{\text{էկվ}} = \frac{\beta^{2n-0.5}}{3} \cdot d\varepsilon \sqrt{\frac{1+4\cdot\alpha^m}{\alpha^m}} :$$

ձժ ծակոտկենության աճը ևս արտահայտենք առանցքային դեֆորմացման աճի միջոցով, այդ դեպքում կստանանք.

$$d\theta = \frac{6\cdot\alpha^m(1-\theta)\cdot(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)}{2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta + 2\alpha^m(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)} \cdot d\varepsilon_z :$$

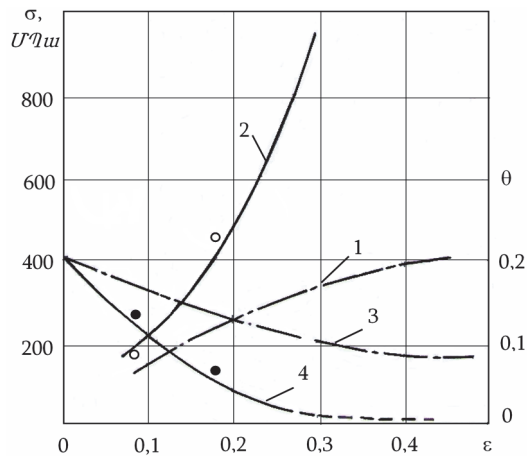
Ինտեգրենք ստացված հավասարումը՝ հաշվի առնելով σ_θ -ի բանաձևը, կգտնենք

$$\theta = 1 - (1 - \theta_0) \exp \varepsilon ,$$

որտեղ θ_0 -ն սկզբնական հարաբերական ծակոտկենությունն է:

Վերը նշված հավասարումները բացահայտում են σ ճնշման և θ ծակոտկենության կախվածությունը դեֆորմացման աստիճանից մեկ և եռառանցքանի սեղմման դեպքում կոշտ գլանաձև մայրակում: Իմանալով $d\varepsilon$ -ն, n և m պարամետրերը, ինչպես նաև θ_0 սկզբնական ծակոտկենությունը և օգտվելով $\sigma_{\text{էկվ}}$ -ի և $d\theta$ -ի կամ $d\varepsilon_{\text{էկվ}}$ -ի և $d\theta$ -ի բանաձևերից, հաշվարկվել է θ -ն և $\int d\varepsilon_{\text{էկվ}}$ -ը: Այնուհետև դեֆորմացման դիագրամից գտնվել է $\sigma_{\text{էկվ}}$ -ի համապատասխան արժեքը, իսկ $\sigma_{\text{էկվ}}$ -ի բանաձևերից՝ մամլման ճնշումը: Արդյունքում՝ կառուցվել են $(\theta - \varepsilon)$ և $(\sigma - \varepsilon)$ կախվածության գրաֆիկները՝ 13%Ni+3%Al+1,0%Cr+0,8%Zr+Cu մև բաղադրությամբ բովախառնուրդից պատրաստված $\theta_0=0,2$ հարաբերական ծակոտկենությամբ ծակոտկեն փորձանմուշների համար (նկ.):

Ինչպես տեսնում ենք, եռառանցքանի սեղմման դեպքում 2-րդ կորը տեղաբաշխված է զգալիորեն բարձր, քան միառանցքանի սեղմման դեպքում (1 կոր): Այդպես էլ պետք էր ակնկալել, քանի որ եռառանցքանի սեղմմամբ նյութի ծակոտկենությունը (4 կոր) նվազում է ավելի արագ, քան միառանցքանի դեպքում (3 կոր): Ծակոտկենության արժեքները մեկ և եռառանցքանի սեղմման դեպքերում, որոնք հաշվարկված են $d\theta$ -ի և θ -ի բանաձևերով, բերված են աղյուսակում, որից տեսնում ենք, որ եռառանցքանի սեղմման դեպքում ծակոտկենությունը նվազում է այնքան ինտենսիվ, որքան փոքր է նմուշի սկզբնական հարաբերական ծակոտկենությունը: Այսպես, օրինակ, նյութի ծակոտկենությունը եռառանցքանի սեղմման դեպքում նվազում է 2,15 անգամ ավելի շատ, քան միառանցքանի սեղմման դեպքում: Սկզբնական ծակոտկենության փոքրացումը մեծացնում է այս հարաբերությունը, և արդեն $\theta_0=0,1$ դեպքում այն հասնում է 4,60-ի:



Նկ. 13%Ni+3%Al+1,0%Cr+0,8%Zr+Cu_{մն} բաղադրությամբ բովախառնուրդից պատրաստված ծակոտկեն փորձանմուշների սեղմման դիագրամը տարբեր բեռնվածությունների դեպքում. 1, 2 - ($\sigma - \epsilon$) կոորդինատային համակարգում, 3, 4 - ($\theta - \epsilon$) կոորդինատային համակարգում, 1, 3- միառանցքանի սեղմում, 2, 4- եռառանցքանի սեղմում

Աղյուսակ

Պեֆորմացման սխեմայից կախված ($m=0,75$, $n=0,2$) նյութի ծակոտկենության փոփոխումը

θ_0	α	$d\theta$		$d\theta_2/d\theta_1$
		միառանցքանի սեղմում, $d\theta_1$	եռառանցքանի սեղմում, $d\theta_2$	
0,1	0,0342	-0,0391	-0,18	4,60
0,2	0,0535	-0,0464	-0,16	3,45
0,3	0,0750	-0,0511	-0,14	2,74
0,4	0,0990	-0,0533	-0,12	2,25
0,5	0,11400	-0,0465	-0,10	2,15

Կոմպակտավորման հաշվարկային արժեքները ստուգվել են փորձնականորեն: Նկարում կետերով ցույց են տրված կոնտակտային եռակցման էլեկտրոդների միջուկի համար նախատեսված փորձանմուշների ծակոտկենության փորձնական արդյունքները եռառանցքանի սեղմման դեպքում (2, 4 կորեր), որոնք պատրաստվել են տաք արտամղմամբ 3%Ni+3%Al+1,0%Cr+0,8%Zr+Cu_{մն} բաղադրությամբ բովախառնուրդից: Քանի որ ստատիկ մամլմամբ անծակոտկեն կառուցվածքի ստացումը շատ դժվար է, մեզ չի հաջողվել ստանալ փորձնական կետեր 2 և 4 կորերի ամբողջ երկայնքով, այսինքն՝ մինչև $\epsilon=0,3$: Ինչպես տեսնում ենք, ϵ -ի արժեքի մի քանի տիրույթներում փորձնական տվյալները մոտ են տեսականին, ինչը հնարավորություն է տալիս կիրառելու Գրինի և Գ. Պետրոսյանի տեսությունները կոմպոզիտային իզոտրոպ նյութերի դեպքում: Հետևաբար, մետա-

ղափռչուց արտադրատեսակների ստացման համար անհրաժեշտ է օգտագործել այնպիսի տեխնոլոգիական գործընթացներ, որոնց դեպքում նյութը կենթարկվի ավելի մեծ աստիճանի պլաստիկ դեֆորմացումների, այդ թվում՝ սահքի դեֆորմացման: Այդպիսի գործընթաց է տաք արտամղումը:

Հետազոտությունների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նմուշների մնացորդային ծակոտկենությունը $\theta_0=15\%$ նախնական ծակոտկենության դեպքում ավելի ցածր է, քան $\theta_0=30\%$ նախնական ծակոտկենության դեպքում: Նման օրինաչափություն տեղի ունի ինչպես խտացման ստատիկ, այնպես էլ իմպուլսային եղանակների դեպքում: Դա նշանակում է, որ անծակոտկեն կառուցվածքների ստացման համար ավելի նպատակահարմար է ելային նախապատրաստվածքները պատրաստել նվազագույն ծակոտկենությամբ:

Տաք արտամղման ժամանակ դիսպերս մասնիկներով կարծրացող (ինտերմետաղական ֆազերով) և դիսպերս հատիկներով ամրացվող շերտավոր ծակոտկեն փոշեկոմպոզիտային մետաղական նյութերի դեֆորմացված լարվածային վիճակի և կառուցվածքագոյացման մեխանիզմի վերլուծման արդյունքում բացահայտվել է, որ արտամղման ժամանակ արտամղվող շերտավոր փոշեկոմպոզիտային մետաղական նյութի օղակաձև շերտերը ենթարկվում են ոչ միայն առանցքային և լայնական, այլ նաև սահքի դեֆորմացման: Վերջինս ներքին շերտերից դեպի մակերևութային շերտեր աճում է: Աճում են նաև երկարացմանը նպաստող հիմնական լարումները և սահքի դեֆորմացումների գումարը: Ցույց է տրված, որ մամլման մասի ելքի մոտ երկարացմանը նպաստող գլխավոր լարումների ուղղությունները տարբեր են. դրանք կազմում են մամլման առանցքի հետ որոշակի անկյուն, որը նույնպես աճում է դեպի մակերևութ: Արդյունքում՝ ցույց է տրված, որ գլխավոր շառավղային և շրջանագծային դեֆորմացումները արգելակող դեֆորմացումներ են: Միաժամանակ, ներքին շերտերի գոտում լրացուցիչ սեղմող լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող լարումներին, չեն փոխում մետաղի լարվածային վիճակը. այն մնում է նույնը, այսինքն՝ բոլոր կողմերից անհավասարաչափ սեղմված: Արտաքին շերտերի գոտում ձգման լրացուցիչ լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող երկայնական լարումներին, փոքրացնում են դրանք, իսկ որոշ պայմանների դեպքում, գերազանցելով դրանց, փոխում են մետաղի լարվածային վիճակի տեսքը և բոլոր կողմերից անհավասարաչափ սեղմումը ձևափոխում երկկողմանի (ընդլայնական) սեղմման և երկայնական ձգման:

Եռակալված շերտավոր փոշեկոմպոզիտային նյութերի (արտաքին շերտ - $1,0\%Cr+0,8\%Zr+Cu_{\text{մե}}$, ներքին շերտ - $13\%Ni+3\%Al+1,0\%Cr+0,8\%Zr+Cu_{\text{մե}}$) տաք արտամղման գործընթացների հետազոտումը ցույց է տվել, որ նույն մետաղական հիմքով, բայց տարբեր քիմիական բաղադրությամբ շերտերի միջև ապահովվում է ֆիզիկական կոնտակտի առաջացում՝ ամուր մետաղական կապի գոյացումով:

Վճռորոշը ոչ միայն տնտեսական գործոնն է, այլև սկզբունքորեն նոր նյութերի ստեղծումը, որոնց ստացումն անհնար է մետալուրգիական ավանդական եղանակներով:

Տաք արտամղումից հետո մշակված շերտավոր փոշեկոմպոզիտային նյութը ենթարկվել է ջերմամշակման՝ թրծման, միման, ճնշմամբ մշակման և ծեղացման: Թրծման ջերմաստիճանն ընտրվել է մեխանիկական հատկությունների ջերմաստիճանային կախվածության գրաֆիկից, համաձայն որի այն գտնվում է համեմատաբար նեղ տիրույթում՝ $T_{\text{լ}}=650\dots700^{\circ}\text{C}$, իսկ տևողությունը վերցվել է 1...2 ժ կախված վառարանի բեռնավորման աստիճանից:

Համալիր գիտափորձական հետազոտությունների արդյունքում որոշվել են ամրացնող ջերմային մշակման (միում, ծրացում) լավարկված պարամետրերը՝ $T_{\text{մ}}=1000\pm25^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{մ}}=1\dots1,5$ ժ, $T_{\text{ծ}}=450\pm25^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{ծ}}=6$ ժ, որոնց դեպքում ապահովվում են ոչ միայն բարձր մեխանիկական հատկություններ՝ α -պինդ լուծույթի հիմքով արտաքին շերտի $\sigma_{\text{ծ}}=550\dots600$ ՄՊա, $\text{HB}=1550\dots1850$ ՄՊա, $\delta=10\dots20\%$, իսկ α -պինդ լուծույթի հիմքով ներքին շերտի $\sigma_{\text{ծ}}=900\dots950$ ՄՊա, $\delta=10\dots15\%$, $\text{HB}=2500\dots2600$ ՄՊա, այլև արտաքին շերտի բարձր ջերմահաղորդականություն ($\chi=70$ Վտ/Գ.ս), էլեկտրահաղորդականություն՝ պղնձի հաղորդականության $\approx 80\%$ -ը և ներքին շերտի ջերմակայունություն՝ մինչև 500°C :

Եզրակացություն. Տեսական վերլուծությամբ և փորձական եղանակով հիմնավորվել է տաք արտամղման գործընթացի առավելությունը դիսպերս մասնիկներով կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող փոշեհամաձուլվածքների կոմպակտավորման ժամանակ: Սահմանվել են պղնձի հիմքով դիսպերս մասնիկներով կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող փոշեկոմպոզիտային նյութերի տաք արտամղման հիմնական օրինաչափությունները՝ կախված ջերմաստիճանից, պահման տևողությունից, նախնական ծակոտկենությունից, մայրակի անկյունից և արտամղման գործակիցից: Բացահայտվել են $13\%\text{Ni} + 3\%\text{Al} + 1,0\%\text{Cr} + 0,8\%\text{Zr} + \text{Cu}_{\text{մ}}$ բաղադրությամբ փոշեկոմպոզիտային նյութերի տաք արտամղման դեպքում կառուցվածքագոյացման օրինաչափությունները: Գիտափորձերի արդյունքների մշակմամբ արտածվել են ամրության և կարծրության կախվածությունները տաք արտամղման պարամետրերից, որի արդյունքում կատարվել են տաք արտամղման լավարկված ռեժիմների ընտրում և հիմնավորում: Արտամղման ջերմաստիճանը՝ $T_{\text{մ}}=900\dots950^{\circ}\text{C}$, արտամղման ջերմաստիճանում պահման տևողությունը՝ $\tau_{\text{մ}}=1\dots1,5$ ժ, մայրակի կոնական անկյունը՝ $2\alpha_{\text{մ}}=110^{\circ}$ և արտամղման գործակիցը՝ $\lambda=4\dots5$:

Հետազոտությունը կատարվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Նյութագիտություն և մետալուրգիա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Николаев А.К., Розенберг В.М.** Сплавы для электродов контактной сварки.- М.: Металлургия, 1978.- 96 с.
2. Современные композиционные материалы / Под ред. **И.Л. Светлова**.- М.: Мир, 1970.- 672 с.
3. **Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р.** Новые композиционные материалы.- Киев: Вища школа, 1977.- 312 с.
4. **Ковальченко М.С.** Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением.- Киев: Наукова думка, 1980.- 240 с.
5. **Манукян Н.В.** Технология порошковой металлургии.- Ереван: Айастан, 1986.- 230 с.
6. **Агбальян С.Г.** Теоретические и технологические основы формирования структуры и свойств порошковых материалов при экструзии: Автореф. дис.... докт. техн. наук.- Ереван, 1992.- 33 с.
7. **Վափրյան Գ.Ա.** Պղնձի հիմքով բարձրամուր կոմպոզիցիոն նյութերի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը: Տ. գ. թ. ատենախոսության սեղմագիր.- Երևան, 2013.- 23 էջ:
8. **Агбальян С.Г., Василян Г.А., Саркисян А.Р., Бояджян С.Г.** Разработка технологии получения высокопрочных композиционных материалов для электродов контактной сварки // Вестник ГИУА: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2015.- № 2.- С. 20-32.
9. **Грин Р.Дш.** Теория пластичности пористых тел // Механика: Периодический сборник переводов иностранных статей.- М., 1973.- № 4 (140).- С. 109-120.
10. **Петросян Г.Л.** О теории пластичности пористых тел // Изв. Вузов. Сер. Машиностроение.- 1977.- № 5.- С. 10-13.
11. **Петросян Г.Л.** Деформационная теория пластичности пористых материалов // Изв. Вузов. Сер. Машиностроение.- 1978.- № 11.- С. 5 - 8.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.06.2017:

С.Г. АГБАЛЯН, А.Р. САРКИСЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ
ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСНО-ТВЕРДЕЮЩИХ И УПРОЧНЯЕМЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

Показано, что используемые порошковые композиционные материалы для электродов контактной сварки должны быть на основе меди, причем упрочнение матрицы должно производиться термообработкой с механизмом твердения дисперсными частицами и упрочнения дисперсными зернами, а высокие электропроводность, теплопроводность и термостойкость должны обеспечиваться использованием композиционных материалов со слоистой структурой. При этом высокие электропроводность и теплопроводность наружного слоя должна обеспечивать низколегированная медная матрица, а высокие механические свойства и теплостойкость сердцевины – высоколегированный композиционный материал с беспористой структурой на основе меди, причем беспористость целесообразно обеспечить горячим выдавливанием. Выявлено, что при горячем выдавливании ограничивающим фактором является коэффициент вытяжки λ , с увеличением которого резко возрастают механические свойства материалов. Показано, что максимальные их значения достигаются при $\lambda = 4...5$. Исследованы механизмы структурообразования и кинетика горячей экструзии порошкового композиционного материала с составами $13\%Ni+3\%Al+1,0\%Cr+0,8\%Zr+Cu_{ост}$ и выбраны оптимальные режимы.

Ключевые слова: порошковый композиционный материал, прессование, спекание, горячее выдавливание, дисперсионное твердение, дисперсионное упрочнение, теплостойкость, электропроводность.

S.G. AGHBALYAN, A.R. SARKISYAN

**INVESTIGATING THE PROCESS OF HOT EXTRUSION OF POWDER
COPPER-BASED DISPERSELY-HARDENING AND STRENGTHENING
COMPOSITE MATERIALS**

It is shown, that powder composite materials used for contact welding electrodes should be based on copper hot extrusion. In that case, the matrix strengthening should be carried out by heat treatment by hardening with disperse particles and strengthening with disperse grains while high electric and heat conductivity, as well as heat resistance should be ensured by using composite with a layered structure. At that the high electric and thermal conductivity of the outer layer should be ensured by the low- alloyed copper matrix, while the high mechanical properties and heat resistance of the core- be the high – alloyed non-porous structure copper- based composite material, and in this case non-porosity should be ensured by hot extrusion. It is revealed that at hot extrusion, a limiting factor is the stretching coefficient λ , whose growth causes an increase in the mechanical properties of the materials. It is shown that their maximal values are achieved at $\lambda=4...5$. The mechanisms of structurization and the kinetics of hot extrusion of powder composite materials with compositions $13\%Ni+3\%Al+1,0\%Cr+0,8\%Zr+Cu_{ост}$ are investigated, and optimal modes are selected.

Keywords: powder composite material, pressing, roasting, hot extrusion, dispersed hardening, disperse strengthening, thermal resistance, electrical conductivity.

Ն.Գ. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ, Կ.Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ,
Վ.Վ. ՍԱՐՈՅԱՆ

**ՏԵՂԱԿԱՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՍԲ ԿՈՄՊՈԶԻՏՈՒՄԻՆ
ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Առաջարկվել են տեղական հանքանյութերի օգտագործմամբ կոմպոզիտային ինքնա-
յուզվող պոլիմերային հիմքով նյութերի ստացման տեխնոլոգիան և մետաղապոլիմերային
շփահակում շփանյութափոխանցման թաղանթների երկարակեցության գնահատման
հաշվարկային բանաձևը: Ամբողջական գործոնային փորձարկումների մեթոդով իրակա-
նացվել է կոմպոզիտների բաղադրակազմերի լավարկումը, ինչը հնարավորություն է ընձե-
ռում առաջարկել նյութեր՝ մաշման նվազագույն ուժգնությամբ և շփման գործակցի արժեքով:

Առանցքային բառեր. պոլիմեր, լցանյութ, շփանյութափոխանցում, մաշվածք,
շփման գործակից, թաղանթի երկարակեցություն:

Ներածություն: Չոր շփման պայմաններում աշխատանքի մեծ ռեսուրս և
նվազագույն մաշում ապահովող շփահանգույցների ստեղծումը, ինչպես նաև շփա-
նյութափոխանցման (ՇՆՓ) թաղանթների զարգացման դինամիկայի հետազո-
տումը հնարավորություն են տալիս բարձրացնելու մեքենաների և մեխանիզմների
մետաղապոլիմերային շփահանգույցների երկարակեցությունն ու մաշակայունու-
թյունը [1-3]: Պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտային նյութերը, բազմաթիվ դրական
հատկությունների շնորհիվ, լայն կիրառություն են գտել մեքենաշինության տար-
բեր ճյուղերում:

Աշխատանքի նպատակը պոլիմերային հիմքով հակաշփական կոմպոզիտա-
յին նյութերի ու մեքենամասերի, տեղական հանքանյութերի օգտագործմամբ շփա-
հանգույցների մակերևութային շերտերի շփագիտական հետազոտումների, ինչ-
պես նաև չոր շփման պայմաններում մետաղապոլիմերային շփահամակարգում
ՇՆՓ թաղանթների երկարակեցության հաշվարկի և քանակական գնահատման
ու վերլուծության իրականացումն է:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Բուն պոլիմերի համեմատ՝
լցանյութերի տեսակի, քանակի և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների փո-
փոխման միջոցով հնարավոր է ստանալ ֆիզիկամեխանիկական և շփագիտական
շատ ավելի բարձր հատկություններ: Որոշ հանքանյութեր հաջողությամբ կարող
են կիրառվել որպես կոմպոզիտային ինքնայուզվող պոլիմերային նյութերի լցա-
նյութեր: Դիտարկվում է դրանցից երկուսի՝ մոլիբդենի և պղնձի խտանյութերի՝

որպես լցանյութերի արդյունավետությունն ացետալների խմբին պատկանող ֆորմալդեհիդի և դիօքսոլանի համապոլիմերի (ՖՂՀ) դեպքում: Նշված խտանյութերն արտադրվում են Քաջարանի պղնձամոլիբդենային կոմբինատում, և դրանց ստացման համար կիրառվում է մոլիբդենիտի ֆլուտացում՝ պղնձի սուլֆիդի կորզմամբ ծծմբային նատրիումի միջոցով, իսկ որպես փրփրիչ ծառայում է տերպինեոլը: Աղ. 1-ում ներկայացված է օգտագործված խտանյութերի քիմիական բաղադրակազմը:

Աղյուսակ 1

Խտանյութերի քիմիական բաղադրակազմը

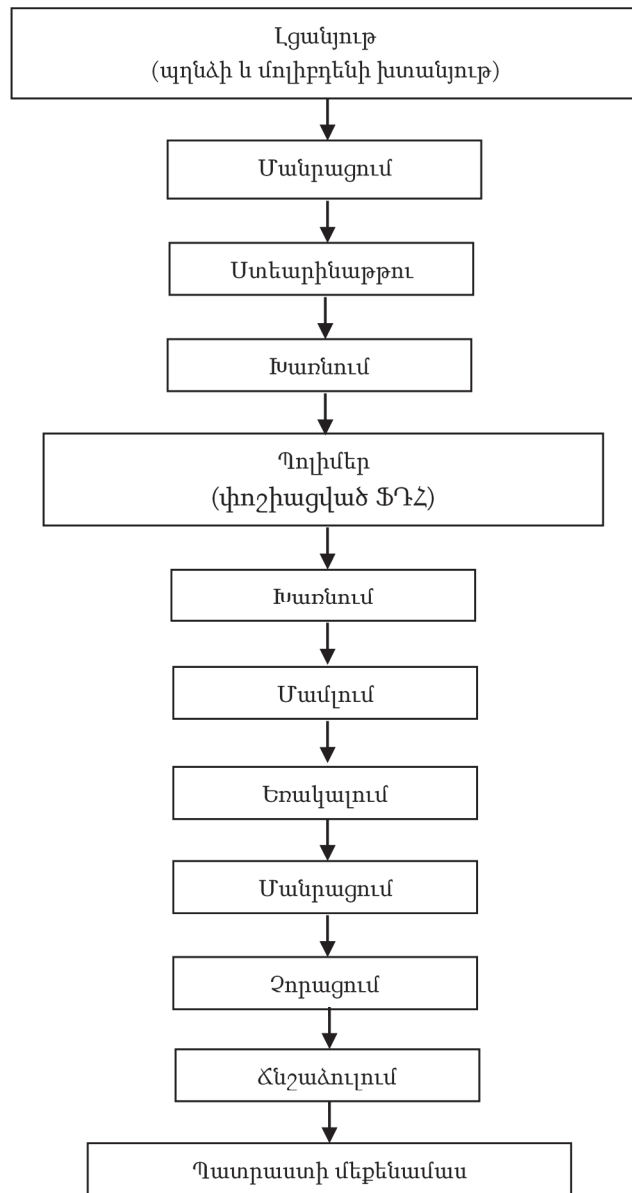
Խտանյութ	Բաղադրակազմ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MoS ₂	CuS
Մոլիբդենի խտանյութ		9,0	1,2	0,54	-	-	-	82,0	1,6
Պղնձի խտանյութ		7,3	2,3	24,0	13,0	1,1	0,46	0,02	46,0

Լցանյութերը մանրացվել են մինչև 12...40 մկմ հատիկայնությամբ շիթային աղացում և ակտիվացվել են մակերևութային ակտիվ նյութով՝ ստեարինաթթվով՝ հակաշփական հատկությունները բարձրացնելու նպատակով: Լցանյութերի պարունակությունը կոմպոզիտներում փոփոխվել է 1...20 կշ.%. Կոմպոզիտային ինքնայուղվող պոլիմերային հիմքով նյութերի ստացման տեխնոլոգիան ներկայացված է նկ. 1-ում:

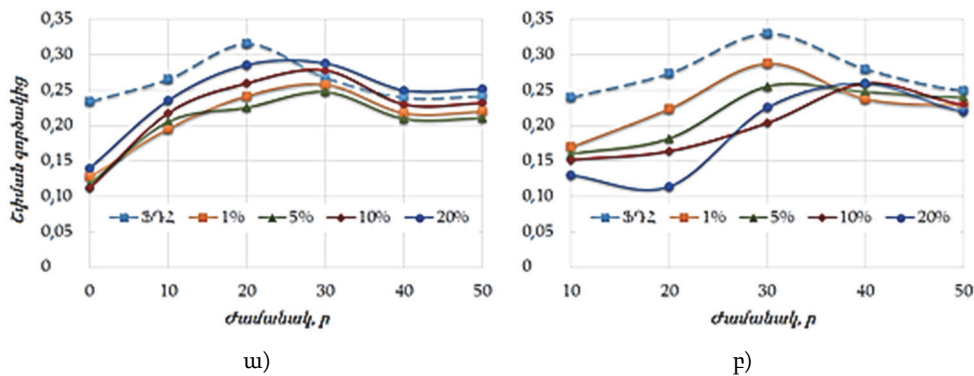
Փորձերի ընթացքում որպես հակամարմին օգտագործվել են պողպատ 45-ից պատրաստված օղակներ, որոնց կարծրությունն է 48...52 HRC, իսկ աշխատանքային մակերևույթը հղկվել է մինչև $R_a = 0,8$ մկմ խորդուբորդության չափ: Կոմպոզիտային նյութերը փորձարկվել են ՇՄ-01 շփամեքենայի վրա՝ «մատ-օղակ» շփման սխեմայով, 0,7 ՄՊա բեռնվածքի և 0,8 մ/վ սահքի արագության պայմաններում: Փորձարկման ընթացքում գրանցվել են շփման գործակցի, մաշման ուժգնության և մակերևութային ջերմաստիճանի արժեքները:

Հետազոտության արդյունքները: Պոլիմերային շփանյութերի հակաշփական հատկությունների վրա հանքանյութերի ազդեցության փորձարարական արդյունքները (նկ. 2) վկայում են, որ մոլիբդենի խտանյութի մեջ MoS₂-ի բարձր պարունակությունը նպաստել է պոլիմերային կոմպոզիտի շփման գործակցի արժեքի զգալի նվազմանը: Պղնձի խտանյութի համար դիտարկվում է մոտավորապես նույն պատկերը:

Կոմպոզիտների մաշակայունության վրա հանքանյութերի ազդեցության փորձարարական արդյունքները ցույց են տալիս, որ մոլիբդենի խտանյութը զգալիորեն բարելավում է պոլիմերի մաշակայունությունը՝ փոքրացնելով մաշվածքի չափը 8,5...9,2 անգամ (նկ. 3), անկախ լցանյութի քանակությունից:

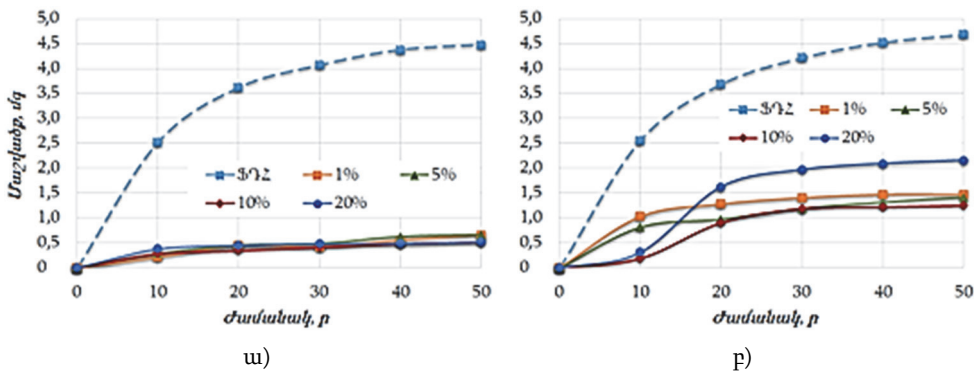


Նկ. 1. Կոմպոզիտային ինքնայուղվող պոլիմերային հիմքով նյութերի ստացման տեխնոլոգիան



Նկ. 2. Մոլիբդենի (ա) և պղնձի (բ) խտանյութերով լցված ՖՂՀ-ի շփման գործակիցի կախվածությունը ժամանակից

Պղնձի խտանյութի օգտագործման պարագայում բոլոր կոմպոզիտների մաշվածքի չափը նույնպես զգալիորեն (2,5...4,1 անգամ) փոքր է բուն պոլիմերի արժեքից, սակայն նվազագույն մաշվածքը ստացվել է լցանյութի պարունակության 10 կշռ.% դեպքում: Այսպիսով, մոլիբդենի և պղնձի խտանյութերի օգտագործումը որպես լցանյութ ֆորմալդեհիդի և դիօքսոլանի համապոլիմերի դեպքում հանգեցնում է կոմպոզիտի մաշակայունության զգալի բարելավմանը՝ միաժամանակ ապահովելով շփման փոքր գործակից:



Նկ. 3. Մոլիբդենի (ա) և պղնձի (բ) խտանյութերով լցված ՖՂՀ-ի մաշվածքի չափի կախվածությունը ժամանակից

Ֆազային և ֆիզիկաքիմիական փոխակերպումները, որոնք տեղի են ունենում մետաղապոլիմերային շփահպակում, զգալի ազդեցություն են ունենում կոմպոզիտների մակերևութային շերտերի ֆիզիկամեխանիկական և շփաքիմիական հատկությունների վրա, նպաստելով բարձր ամրությամբ և մաշակայունությամբ ՇՆՓ թաղանթների ձևավորմանը [4-7]: Շփագույգի աշխատանքի արդյունավետությունը որոշվում է նյութի ոչ միայն «սկզբնական», այլև «երկրորդային» կառուց-

վածքով, որը ձևավորվում է շփման փոխազդեցության՝ շփանյութափոխանցման ընթացքում:

Ֆիզիկաքիմիական գործընթացների հիման վրա առաջարկված շփանյութափոխանցման թաղանթների ձևավորման մեխանիզմը [8,9] հնարավորություն է տալիս մշակելու և առաջարկելու թաղանթի հաստության և երկարակեցության գնահատման հաշվարկային մեթոդիկան: Ամփոփելով փորձարարական արդյունքները՝ վերլուծական եղանակով ստացվել է թաղանթների երկարակեցության հաշվարկային բանաձևը, ինչը հնարավորություն է տալիս կանխագուշակելու մետաղապոլիմերային շփահանգույցներում ձևավորված թաղանթների երկարակեցությունը:

$$T = \lambda h_{max}^{2/5} / \exp(-0,4E_a/k\theta), \quad (1)$$

որտեղ $\lambda = 0,22 \cdot 10^{-2} (h/ga^2 k\theta)^{2/5}$, h -ը Պլանկի հաստատունն է, g -ն՝ երկրաչափական գործոնը, a -ն՝ ատոմի տրամագիծը, k -ն՝ Բոլցմանի հաստատունը, θ -ն՝ մակերևութային ջերմաստիճանը, $E_a = E_0 + \beta_0 b^2 P_a^{2/3} - \alpha_0 / 2(c^2 t^2 + \sigma_s^2)$ ՝ մետաղի ատոմների ակտիվացման էներգիան, E_0 -ն՝ մինչև շփումը ակտիվացման ազատ էներգիան,

$$\alpha_0 = \frac{k_\sigma^2 V_0}{6G}, \beta_0 = \frac{k_\sigma^2}{2K} V_0, \underline{k}_\sigma \text{ -ն՝ ատոմային կապերի գերլարումը հաշվի առնող գոր-}$$

ծակիցը, V_0 -ն՝ ատոմի ծավալը, K -ն՝ ծավալային սեղմման մոդուլը, G -ն՝ սահքի մոդուլը, b , c -ն՝ նյութի առաձգական հատկությունները և շփման մակերևութային խորդուբորդության երկրաչափական պարամետրերը բնութագրող գործակիցները, P_a -ն՝ տեսակարար բեռնվածքը, σ_s -ը՝ հոսունության սահմանը, $\tau = fP_a$ ՝ տեսակարար շփման ուժը, f -ը՝ շփման գործակիցը, ρ -ն՝ պողպատի խտությունը, t -ն՝ գործընթացի տևողությունը, h_{max} -ը՝ շփանյութափոխանցման թաղանթի առավելագույն հաստությունը: Աղ. 2-ում բերված են (1) բանաձևով հաշվարկված մետաղական հակամարմնի վրա ձևավորված պոլիմերային թաղանթների երկարակեցության արժեքները:

Աղյուսակ 2

Շփանյութափոխանցման թաղանթների երկարակեցության հաշվարկային արժեքները
($t = 60$ ր, $P_a = 1,91$ ՄՊա, $v = 0,78$ մ/վ)

Նյութը	Թաղանթի երկարակեցությունը T , 10 ⁶ վ
USU-2	3,82
Էստերան-51	4,32
ՖՂՀ	4,65
ՖՂՀ+մոլիբդենի խտանյութ	6,46
ՖՂՀ+պղնձի խտանյութ	6,22

Ինչպես երևում է աղ. 2-ից, մշակված կոմպոզիտների շփման ընթացքում առաջացած թաղանթների երկարակեցությունը 1,5 անգամ ավելի մեծ է հայտնի կոմպոզիտների շփման արդյունքում առաջացած թաղանթների երկարակեցության արժեքից: Այսպիսով, խնդրի լուծումը մետաղ-պոլիմեր համակարգում շփման և մաշման պրոցեսների արդյունավետ կառավարման և դեկավարման, աշխատունակ և մաշակայուն կոմպոզիտային նյութերի հիմնավորված ընտրության հնարավորություն է ընձեռում:

Ամբողջական գործոնային փորձարկումների մեթոդով [10] իրականացվել է կոմպոզիտների բաղադրակազմերի լավարկումը, արդյունքում ստացվել են նյութեր՝ մաշման նվազագույն ուժգնությամբ և շփման փոքր գործակցի արժեքով: Որպես արձագանքի ֆունկցիա ընդունվել են հանքանյութի x_1 և ստեարինաթթվի x_2 պարունակությունները: Փորձարարական տվյալների ծրագրային մշակման արդյունքում ստացվել են ռեգրեսիոն հավասարումներ, որոնք արտացոլում են լցանյութերի ազդեցությունը կոմպոզիտների հիմնական շահագործական հատկությունների վրա:

$$I \cdot 10^{-9} = 8,03 - 0,032x_1 + 0,372x_2 - 4,09x_1x_2 + 0,348x_1^2 + 0,448x_2^2, \quad (2)$$

$$f = 0,399 - 0,032x_1x_2 + 0,0068x_1^2 + 0,016x_2^2: \quad (3)$$

Ստացված հավասարումների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ մաշման ուժգնության և շփման գործակցի վրա ավելի մեծ ազդեցություն է ունենում հանքանյութի և ստեարինաթթվի համատեղ օգտագործումը: Կոմպոզիտների բաղադրակազմի լավարկումը կատարվել է հատուկ էլեկտրոնային ծրագրով (2) և (3) հավասարումներով նկարագրված արձագանքի մակերևույթների վերլուծության արդյունքում: Մաշման նվազագույն ուժգնությամբ և շփման փոքր գործակցով օժտված են այն կոմպոզիտները, որոնց կազմում հանքանյութի պարունակությունն է $x_1 = 10 \dots 13,6$ կշռ.%, իսկ ստեարինաթթվինը՝ $x_2 = 8 \dots 10,4$ կշռ.%: Այսպիսով, հակաշփական նշանակությամբ մեքենամասեր պատրաստելու համար առաջարկվում է կոմպոզիտային նյութերի հետևյալ բաղադրակազմը՝ կապակցող պոլիմերային նյութ (ՖՂՀ)՝ 76...82 կշռ.%, հանքային լցանյութ՝ 10...13,6 կշռ.%, ստեարինաթթու՝ 8...10,4 կշռ.%: Նշված բաղադրակազմով կոմպոզիտային նյութերից պատրաստված նմուշների լավարկված մաշման ուժգնության և շփման գործակցի արժեքներն են՝ $I = 3,22 \cdot 10^{-9} \dots 5,42 \cdot 10^{-9}$, $f = 0,093 \dots 0,118$:

Եզրակացություն: Տեղական հանքանյութերի՝ մոլիբդենի և պղնձի բնական խտանյութերի օգտագործումը որպես լցանյութ ՖՂՀ համար նպաստում է ինքնալուծվող պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտի շփագիտական հատկությունների զգալի բարելավմանը: Ստեարինաթթվով մոդիֆիկացված հանքանյութերի կիրառումը պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտներում հանգեցնում է կոմպոզիտի մաշվածքի չափի զգալի բարելավմանը՝ միաժամանակ ապահովելով շփման փոքր գործակցից:

Ամբողջական գործոնային փորձարկումների մեթոդով իրականացված կոմպոզիտների բաղադրակազմերի լավարկման արդյունքում առաջարկվել են նյութեր՝ մաշման նվազագույն ուժգնությամբ և շփման փոքր գործակցի արժեքով: Երաշխավորվում են ինքնայուղվող պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտային նյութեր հետևյալ բաղադրակազմով՝ կապակցող նյութ (ՖԴՀ)՝ 76...82 *կշռ. %*, հանքային լցանյութ՝ 10...13,6 *կշռ. %*, ստեարինաթթու՝ 8...10,4 *կշռ. %*: Երաշխավորվում է ստացված կոմպոզիտային նյութերի գործնական կիրառումը մեքենաների ու մեխանիզմների տարբեր նշանակությամբ շփահանգույցների մասերի՝ սահքի առանցքակալների և ուղղորդիչների, մանրամոդուլ ատամնանիվների և չոր շփման $Pv \leq 2,0$ *ՄՊա·մ/վ* պայմաններում աշխատող պոլիմերային այլ մեքենամասերի պատրաստման համար:

Առաջարկվել է շփանյութափոխանցման թաղանթների երկարակեցության գնահատման հաշվարկային բանաձևը, որը հնարավորություն է ընձեռում շփագիտական պարզ և փոքրաթիվ փորձերի արդյունքների հիման վրա կանխագուշակել մետաղապոլիմերային շփահանգույցներում ձևավորված թաղանթների երկարակեցությունը և կատարել կոմպոզիտային նյութերի հիմնավորված ընտրություն, կանխատեսելով դրանց աշխատունակությունը և մաշակայունությունը:

Հետազոտությունը կատարվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Շփագիտություն» բաժանի գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Трибология: Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. **В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина**. – М.: Машиностроение, 1993. – 454 с.
2. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под общ. ред. **А.В. Чичинадзе**. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
4. **Погосян А.К., Карапетян А.Н., Оганесян К.В.** Трибохимические процессы и их влияние на фрикционные свойства антифрикционных полимеров // Тр. Межд. конф. “Поликомтриб-2013”. – Гомель, 2013. – С. 184.
5. **Pogosian A.K., Karapetyan A.N., Hovhannisyan K.V.** Development of composite antifriction materials based on the thermoplastic polymers // Tribologia. – 2005. – N 5. – P. 111-119.
6. **Pogosian A.K., Bahadur S., Hovhannisyan K.V., Karapetyan A.N.** Investigation of the tribochemical and physicomechanical processes in sliding of mineral-filled formaldehyde copolymer composites against steel // Wear. – 2006. – N 260. – P. 662-668.
7. **Pogosian A.K., Hovhannisyan K.V., Isajanyan A.R.** Polymer friction transfer: Encyclopedia: Springer Science. – New-York, 2013. – P. 2585-2592.

8. Մելիքսեթյան Ն.Գ., Հովհաննիսյան Կ.Վ., Կարապետյան Ա.Ն., Սարոյան Վ.Վ. Մետաղապոլիմերային շփահանգույցներում ինքնայուղման մեխանիզմի հետազոտումը և դիֆուզիոն մոդելի մշակումը // ՀԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. – 2016. – Հատ. LXIX, N3. – էջ 228-235:
9. Карапетян А.Н., Оганесян К.В., Сароян В.В. Влияние физико-механических и трибохимических процессов на формирование пленок фрикционного переноса // Труды Межд. научн.-техн.конф. "Поликомтриб-2015". – Гомель, Беларусь, 2015. – С. 96.
10. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 21.03.2017:

Н.Г. МЕЛИКСЕТЯН, К.В. ОГАНЕСЯН, А.Н. КАРАПЕТЯН, В.В. САРОЯН
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕСТНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Предложены технология получения композиционных самосмазывающихся материалов на полимерной основе с использованием местных концентратов, а также расчетная формула для оценки долговечности пленок фрикционного переноса в металлополимерном трибоконтакте. Методом планирования многофакторного эксперимента оптимизированы составы композитов, что позволяет рекомендовать материалы с минимальными значениями интенсивности изнашивания и коэффициента трения.

Ключевые слова: полимер, наполнитель, фрикционный перенос, износ, коэффициент трения, долговечность пленки.

N.G. MELIKSETYAN, K.V. HOVHANNISYAN, A.N. KARAPETYAN,
W.V. SAROYAN

TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS OF COMPOSITE POLYMER MATERIALS
BY USING LOCAL CONCENTRATES

A technology for obtaining composite self-lubricating materials based on polymers by using local concentrates, as well as a calculation formula for estimating the friction transfer film durability in metal-polymer tribocontact are proposed. By the method of planning of a multi-factor experiment, the composite components are optimized, that allows to recommend materials with minimum values of wear intensity and coefficient of friction.

Keywords: polymer, filler, friction transfer, wear, coefficient of friction, film durability.

В.С. САФАРЯН, Г.В. АРУТЮНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РЕЖИМОВ
ОДНОРОДНОЙ ЦЕПНОЙ СХЕМЫ**

Исследуются экстремальные свойства режимов цепных схем с одинаковыми не-симметричными четырехполюсниками. Для решения поставленной задачи применяются аналитические выражения функции передачи по току и напряжению, полученные методом структурных чисел. Используя функцию передачи по току, аналитическим путем доказано, что при определенных соотношениях параметров четырехполюсника действующие значения тока и напряжения на выходах звеньев цепной схемы имеют экстремальные значения. Значения экстремальных режимных параметров определяются графическим решением трансцендентного уравнения. Приведены графики изменения действующих значений тока и напряжения на выходе звеньев цепной схемы при различных обобщенных параметрах четырехполюсника.

Ключевые слова: цепная схема, структурные числа, передаточные функции, экстремальные свойства, трансцендентное уравнение, графический метод.

Введение. Цепные схемы используются для моделирования сетей дорожного освещения, электрических фильтров, линий электропередачи с распределенными параметрами и т.д. [1, 2]. Режимы цепных схем можно определить методами контурных токов, узловых потенциалов или же методом подобия (единичного тока) [1, 2]. Выбор одного из перечисленных методов позволит решить задачу численными методами.

Методом структурных чисел [3] получены аналитические выражения (передаточные функции по току и напряжению), связывающие режимные параметры (токи, напряжения, мощности) звеньев цепной схемы с обобщенными параметрами одного звена [4]. В работе [5] исследуются режимы цепных схем численными методами с использованием аналитических выражений передаточных функций по току и напряжению, полученных методом структурных чисел [3]. В отличие от [5], в настоящей работе аналитическим путем обосновано свойство экстремальности цепных схем.

Постановка задачи. Рассматривается схема из n Г-образных, одинаковых, пассивных четырехполюсников при питании со стороны входных зажимов и холостом ходе со стороны выходных. Исследуются экстремальные свойства передаточной функции по току цепной схемы, полученной методом структурных чисел [3].

На рис. 1 представлена исследуемая схема с раскрытой структурой четырехполюсников.

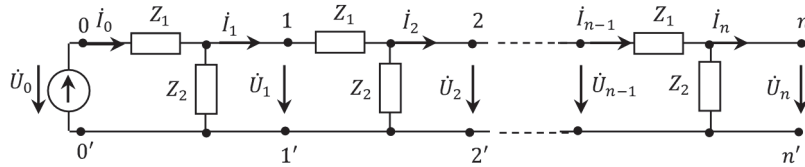


Рис. 1. Каскадное соединение Г-образных четырехполюсников

Решение задачи. Известно, что любой пассивный четырехполюсник характеризуется через входные сопротивления Z_a (Z_b) со стороны входных (выходных) зажимов a, a' (b, b') при холостом ходе и Z_{ab} (Z_{ba}) при коротком замыкании на зажимах b, b' (a, a') соответственно. При этом между этими параметрами существует связь [1,2]

$$Z_a Z_{ba} = Z_b Z_{ab}.$$

Очевидно, что в данном случае имеем

$$Z_a = Z_1 + Z_2, \quad Z_b = Z_2, \quad Z_{ab} = Z_1, \quad Z_{ba} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Алгеброй структурных чисел разработаны соотношения, когда ток (напряжение) любого звена цепной схемы выражается через параметры одного четырехполюсника и их количества n в цепи [4]:

$$i_i = i_0 \dot{K}_{iU} = i_0 \frac{1 - \dot{C}^{n-i}}{1 - \dot{C}^n} \cdot \dot{C}^{i/2}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_0 \dot{K}_{iU} = \dot{U}_0 \frac{Z_{\infty a} + Z_{\infty b} \dot{C}^{n-i}}{Z_{\infty a} + Z_{\infty b} \dot{C}^n} \cdot \dot{C}^{i/2}, \quad (2)$$

где $\dot{C} = \frac{Z_b - Z_{\infty b}}{Z_b + Z_{\infty a}} = C e^{j\varphi}$,

$$Z_{\infty a} = \frac{1}{2} \left((Z_a - Z_b) + \sqrt{(Z_a - Z_b)^2 + 4Z_a Z_{ba}} \right),$$

$$Z_{\infty b} = \frac{1}{2} \left((Z_b - Z_a) + \sqrt{(Z_b - Z_a)^2 + 4Z_b Z_{ab}} \right).$$

Физический смысл величины $\dot{C}$ заключается в том, что если к выходным (входным) зажимам четырехполюсника подключить $Z_H = Z_{\infty a}$ ($Z_H = Z_{\infty b}$), то квадрат коэффициента передачи по напряжению и току будет равен [4]

$$\dot{C} = \dot{K}_U^2 = \dot{K}_I^2.$$

Для несимметричного четырехполюсника $Z_{\infty a}$ ($Z_{\infty b}$) это такая нагрузка, что если к выходным (входным) зажимам четырехполюсника подключить

$Z_n = Z_{\infty a} (Z_n = Z_{\infty b})$, то входное сопротивление будет равно $Z_{\infty a} (Z_{\infty b})$. Если нагрузка $Z_{\infty a} (Z_{\infty b})$ подключена к выходным (входным) зажимам цепной схемы из n одинаковых несимметричных четырехполюсников, то входное сопротивление относительно любых зажимов цепочки будет равно $Z_{\infty a} (Z_{\infty b})$.

Величины $\dot{C}, Z_{\infty a}, Z_{\infty b}$ являются постоянными для данной цепной схемы и зависят от параметров одного четырехполюсника.

Через параметры одного четырехполюсника и их количества n в цепи выражаются также входные сопротивления цепной схемы при коротком замыкании и холостом ходе на выходе [4].

Исследуем распределение действующих значений тока (напряжения) вдоль цепи. Представим выражение (1) с учетом того, что $\frac{i_0}{1-\dot{C}^n}$ не зависит от i :

$$I(i) = \frac{i_0}{1-\dot{C}^n} \left(\dot{C}^{\frac{i}{2}} - \dot{C}^{n-\frac{i}{2}} \right) = \frac{i_0}{1-\dot{C}^n} \dot{A}(i). \quad (3)$$

Из (3) видно, что поведение функции $\dot{I}(i)$ сводится к исследованию функции

$$\dot{A}(i) = \dot{C}^{\frac{i}{2}} - \dot{C}^{n-\frac{i}{2}}.$$

Представим комплексную функцию $\dot{A}(i)$ в алгебраической форме:

$$\dot{A}(i) = a(i) + jb(i),$$

где

$$a(i) = \dot{C}^{\frac{i}{2}} \cos \frac{i}{2} \varphi - \dot{C}^{(n-\frac{i}{2})} \cos \left(n - \frac{i}{2} \right) \varphi, \quad b(i) = \dot{C}^{\frac{i}{2}} \sin \frac{i}{2} \varphi - \dot{C}^{(n-\frac{i}{2})} \sin \left(n - \frac{i}{2} \right) \varphi.$$

Модуль комплексной величины $\dot{A}(i)$ равен

$$A(i) = \sqrt{[a(i)]^2 + [b(i)]^2} = \sqrt{\dot{C}^i + \dot{C}^{2n-i} - 2\dot{C}^n \cos(i-n)\varphi}. \quad (4)$$

Исследуем (4) на экстремум. Для этого найдем производную по i и приравняем ее к нулю:

$$A'(i) = \frac{\dot{C}^i \ln \dot{C} - \dot{C}^{2n-i} \ln \dot{C} + 2\varphi \dot{C}^n \sin(i-n)\varphi}{2 \cdot \sqrt{\dot{C}^i + \dot{C}^{2n-i} - 2\dot{C}^n \cos(i-n)\varphi}} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) сводится к следующему:

$$\begin{cases} \dot{C}^i \ln \dot{C} - \dot{C}^{2n-i} \ln \dot{C} = 2\varphi \dot{C}^n \sin(n-i)\varphi, \\ \dot{C}^i + \dot{C}^{2n-i} - 2\dot{C}^n \cos(n-i)\varphi > 0. \end{cases}$$

Сначала проверим условие существования выражения (5) на интервале $i = \overline{0; n}$. Обозначим $g_1(i) = \dot{C}^i + \dot{C}^{2n-i}, g_2(i) = 2\dot{C}^n \cos(n-i)\varphi$.

Исследуем функцию $g_1(i)$:

$$g_1'(i) = C^i \ln C - C^{2n-i} \ln C = \ln C (C^i - C^{2n-i}).$$

Следовательно, при $C < 1, \ln C < 0, C^i - C^{2n-i} > 0 - g_1'(i) < 0$; при $C > 1, \ln C > 0, C^i - C^{2n-i} < 0 - g_1'(i) < 0$, т.е. $g_1(i)$ - убывающая функция, при этом $g_{1\max}(i) = g_1(0) = 1 + C^{2n}, g_{1\min}(i) = g_1(n) = 2C^n$.

Очевидно, что $g_{1\max}(i) > g_{1\min}(i)$, поскольку $(1 - C^n)^2 > 0, (C \neq 1)$. При $i = n$ функция (5) не определена.

Исследуем функцию $g_2(i)$.

Амплитуда функции $g_{2\max}(i) = 2C^n$. Из сравнения амплитуды функции $g_2(i)$ и наименьшего значения функции $g_1(i)$ приходим к выводу, что $A'(i)$ существует в исследуемом интервале.

Решение полученного трансцендентного уравнения (5) относительно переменной i проводится графическим методом. Обозначим

$$f_1(i) = 2\varphi C^n \sin(n - i) \varphi, \quad f_2(i) = C^i \ln C - C^{2n-i} \ln C.$$

Исследуем функцию $f_1(i)$.

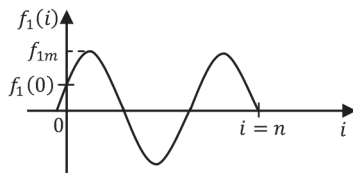
Амплитуда, период, начальная фаза функции $f_1(i)$ зависят от модуля C и аргумента φ комплексной величины $\dot{C}$:

- 1) $f_1(n) = 0$;
- 2) $f_{1\max} = |2\varphi C^n|$;
- 3) псевдопериод функции $f_1(i)$: $T = \frac{2\pi}{\varphi}$;
- 4) начальная фаза функции $f_1(i)$: $(n - i)\varphi|_{i=0} = n\varphi$;
- 5) $f_1(0) = 2\varphi C^n \sin n$.

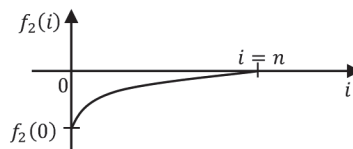
Вид функции $f_1(i)$ представлен на рис. 2а.

Исследуем функцию $f_2(i)$:

- 1) $f_2(n) = 0$;
- 2) $f_2(0) = \ln C (1 - C^{2n}) < 0$;
- 3) $f_2'(i) = \ln^2 C \left(C^i + \frac{C^{2n}}{C^i} \right) > 0$, следовательно, $f_2(i)$ - возрастающая функция.



а) функция $f_1(i)$



б) функция $f_2(i)$

Рис. 2. Вид функций $f_1(i)$ и $f_2(i)$

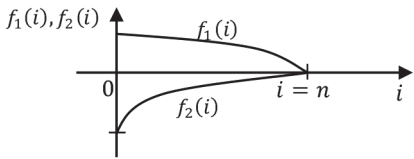
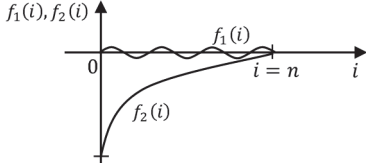
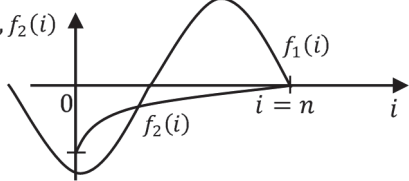
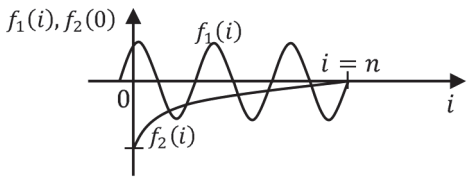
Функция $f_2(i)$ при любых значениях C будет иметь вид, приведенный на рис. 26. При определенных соотношениях между сопротивлениями $Z_1 = Z_{ab}$ и $Z_2 = Z_b$ получаются значения $\dot{C}$, от модуля и аргумента которых зависит распределение тока (напряжения) вдоль звеньев цепи. Очевидно, что графическое решение уравнения (5) сводится к определению координат точек пересечения графиков функций $f_1(i)$ и $f_2(i)$ (табл. 1). Возможны следующие варианты:

- нет точек пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи изменяется монотонно;
- одна точка пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи имеет один экстремум;
- множество точек пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи имеет множество экстремумов.

В табл. 1 приведены примеры возможных решений уравнения (5).

Таблица 1

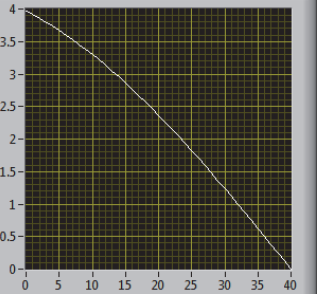
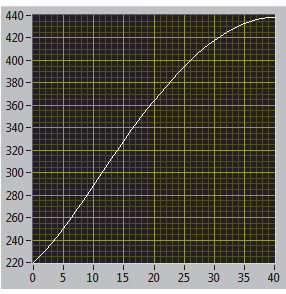
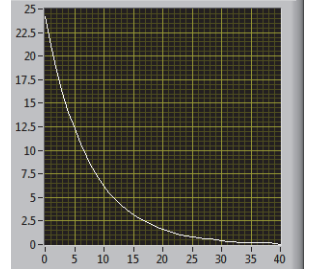
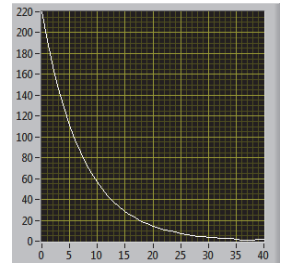
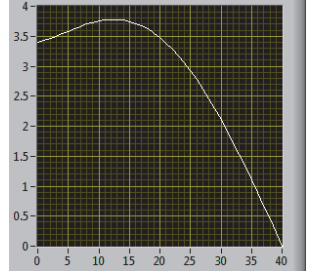
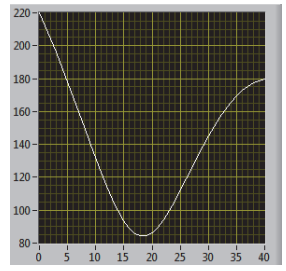
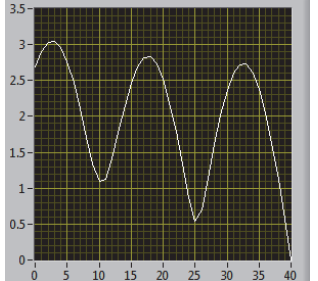
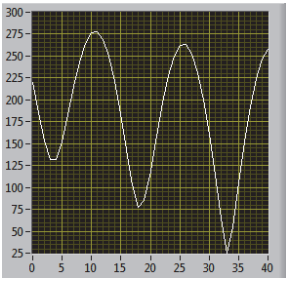
Демонстрация возможных вариантов решения уравнения (5)

Графическое решение	Описание
	$I(i)$ монотонна вдоль всей цепи $\dot{C} = 0,9798 - j0,06$, $\varphi = -3,43^\circ$, $T = 104,9$, $n = 40$.
	$I(i)$ монотонна вдоль всей цепи $\dot{C} = 0,5258 - j0,552$, $\varphi = -46,4^\circ$, $T = 7,75$, $n = 40$.
	$I(i)$ имеет один экстремум $\dot{C} = 0,954 - j0,123$, $\varphi = -7,4^\circ$, $T = 48,64$, $n = 40$.
	$I(i)$ имеет пять экстремумов $\dot{C} = 0,888 - j0,39$, $\varphi = -26,5^\circ$, $T = 13,7$, $n = 40$.

Для исследования распределения действующих значений тока $I(i)$ (напряжения $U(i)$) вдоль цепи разработана программа в графической среде LabVIEW. В табл. 2 приведены зависимости, соответствующие всем вариантам графического решения уравнения (5).

Таблица 2

Графики возможных зависимостей $I(i), U(i)$

$I(i)$	$U(i)$	Исходные данные
		$Z_b = 11 - j3500 \text{ Ом},$ $Z_{ab} = 2 + j3 \text{ Ом},$ $n = 40,$ $\dot{U}_0 = 220 \text{ В},$ $\dot{C} = 0,98 - j0,06,$ $C = 0,98,$ $\varphi_C = -3,5^\circ,$ $T = 102,85 \mu\text{т.}$
		$Z_b = 1 - j20 \text{ Ом},$ $Z_{ab} = 2 + j3 \text{ Ом},$ $n = 40,$ $\dot{U}_0 = 220 \text{ В},$ $\dot{C} = 0,526 - j0,552,$ $C = 0,762,$ $\varphi_C = -46,4^\circ,$ $T = 7,25 \mu\text{т.}$
		$Z_b = 1 - j800 \text{ Ом},$ $Z_{ab} = 2 + j3 \text{ Ом},$ $n = 40,$ $\dot{U}_0 = 220 \text{ В},$ $\dot{C} = 0,954 - j0,123,$ $C = 0,96,$ $\varphi_C = -7,4^\circ,$ $T = 48,64 \mu\text{т.}$
		$Z_b = 11 - j450 \text{ Ом},$ $Z_{ab} = 2 + j20 \text{ Ом},$ $n = 40,$ $\dot{U}_0 = 220 \text{ В},$ $\dot{C} = 0,888 - j0,39,$ $C = 0,97,$ $\varphi_C = -26,5^\circ,$ $T = 13,7 \mu\text{т.}$

Выводы

1. Аналитическим путем доказано свойство экстремальности режимов цепных схем. Определение экстремальных величин действующих значений напряжений и токов проведено графическим путем.
2. Приведены графики действующих значений напряжений и токов цепной схемы при различных значениях параметров четырехполюсника, иллюстрирующие экстремальные свойства режимов цепной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. - М.: Энергоатомиздат, 2007.- 528 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. – СПб.: Лань, 2009.- 592 с.
3. Беллерт С., Возняцки Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел.- М.: Мир, 1972.-332 с.
4. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. К определению передаточных функций цепных схем // Изв. ВУЗ-ов. Электромеханика.-2007.-N3.-С. 7-10.
5. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К анализу режимов однородных цепных схем методом структурных чисел // Вестник НПУА.-2016.-N2.-С. 9-18.

ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики РА”, Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 09.03.2017.

Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Գ.Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՀԱՄԱՍԵՆ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԷՔՍՏՐԵՄԱԼ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հետազոտվել են միատեսակ ոչ սիմետրիկ քառաբևեռներից բաղկացած շղթայական սխեմաների ռեժիմների էքստրեմալ հատկությունները: Խնդրի լուծման համար օգտագործվել են կառուցվածքային թվերի մեթոդով ստացված լարման և հոսանքի փոխանցման ֆունկցիաների անալիտիկ արտահայտությունները: Կառուցվածքային թվերի մեթոդը թույլ է տալիս անալիտիկ տեսքով ստանալ շղթայական սխեմայի օղակների ռեժիմային պարամետրերի (հոսանք, լարում, հզորություն) կախվածությունը տրված պարամետրերից: Նման մոտեցումը հնարավորություն է տալիս ոչ միայն հաշվարկել շղթայական սխեմայի ռեժիմը, այլև հետազոտել ստացված արտահայտությունների հատկությունները: Օգտագործելով հոսանքի փոխանցման ֆունկցիան՝ անալիտիկորեն ապացուցվել է, որ հոսանքի և լարման գործող արժեքները շղթայական սխեմայի օղակների ելքերում կարող են ունենալ էքստրեմալ արժեքներ: Էքստրեմալ ռեժիմների պարամետրերի արժեքները որոշվում են տրանսցենդենտ հավասարման գրաֆիկական լուծմամբ: Ներկայացվել են շղթայական սխեմայի օղակների ելքերում հոսանքի և լարման գործող արժեքների գրաֆիկները քառաբևեռի ընդհանրացված պարամետրերի տարբեր արժեքների դեպքում:

Առանցքային բառեր. շղթայական սխեմա, կառուցվածքային թվեր, փոխանցման ֆունկցիաներ, էքստրեմալ հատկություններ, տրանսցենդենտ հավասարում, գրաֆիկական մեթոդ:

V.S. SAFARYAN, G.V. HARUTYUNYAN

**INVESTIGATING THE EXTREME PROPERTIES OF THE HOMOGENEOUS
LADDER CIRCUIT MODES**

Extreme mode properties of ladder circuits with similar asymmetric four-terminals are investigated. To solve this problem, analytical expressions of the transfer function of current and voltage obtained by the method of structural numbers are used. It is analytically proven that the effective values of voltage and current at the outputs of units of ladder circuits have extreme values. Extreme values of parameters are defined by the graphical solution of the transcendental equation. Graphs of changes in the effective current and voltage values on the output units of ladder circuits for different generalized parameters of the four - terminal are presented.

Keywords: ladder circuit, structural numbers, transfer functions, extreme properties, transcendental equation, graphical method.

Ռ.Ա. ՌԱՖՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ

ԳԱԶԱՏՈՒՐՔԻՆԱՅԻՆ ՏԵՂԱԿԱՑԱՆՔՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐՈՒՄ ԶՐԱՅԻՆ ԳՈԼՈՐՇՈՒ ԹԵՐՄՈԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Վերլուծվել է գազատուրբինային տեղակայանքների (ԳՏՏ) ջերմային հաշվարկում ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերի որոշման ժամանակ վերջինս որպես իդեալական գազ դիտարկելու նպատակահարմարությունը: Ներկայացվել են բանաձևային առնչություններ ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերի, ինչպես նաև խոնավ օդի էնթալպիայի և էնտրոպիայի որոշման համար:

Առանցքային բառեր. գազատուրբինային տեղակայանք, կոմպրեսոր, ջրային գոլորշի, էնթալպիա, էնտրոպիա, այրման արգասիքներ, իդեալական գազ:

Գազատուրբինային տեղակայանքների սկզբունքային ջերմային սխեմայի հաշվարկում ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերն օգտագործվում են կոմպրեսոր ներծծվող խոնավ օդի, կոմպրեսորի ելքում սեղմված օդի և ծխագազերի պարամետրերի որոշման համար:

Հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ այրման արգասիքների թերմոդինամիկական պարամետրերի հաշվարկներում ջրային գոլորշին և այրման արգասիք հանդիսացող մյուս բաղադրիչ գազերը դիտարկվում են որպես իդեալական, ապա նպատակահարմար է կիրառել նույն մոտեցումը նաև օդի՝ կոմպրեսոր ներծծվելիս և դրա ելքում պարամետրերի հաշվարկի դեպքում: Ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելիս, դրա իզոբար ջերմունակության հաշվարկման համար, Ջրի և ջրային գոլորշու հատկությունների միջազգային կազմակերպության (IAPWS [1]) կողմից կիրառվում են [2]-ում բերված հավասարումները, որոնք էլ ստացվել են ըստ [3]-ի տվյալների: Սակայն վերջին տարիներին կատարված հետազոտությունները [4-6] վկայում են այն մասին, որ հատկապես բարձր ջերմաստիճանների դեպքում ստացված արդյունքները տարբերվում են [2]-ի տվյալներից: [7]-ում ջրային գոլորշու համար դուրս է բերվել նոր հավասարում, որով կատարված հաշվարկների արդյունքները [3]-ում բերված տվյալներից տարբերվում են $0,32 \cdot 10^{-2}$ միջին թվաբանական սխալանքով:

Եթե ջրային գոլորշին դիտարկվում է որպես իրական գազ, ապա վերջինիս էնթալպիայի մեջ հաշվի է առնվում թաքնված ջերմաքանակի արժեքը: Սակայն ջերմատեխնիկական տեսանկյունից հետաքրքրություն է ներկայացնում աշխատող մարմնի թերմոդինամիկական պարամետրի փոփոխությունը, այլ ոչ թե դրա

բացարձակ արժեքը: Մասնավորապես, կոմպրեսորում սեղմման հետևանքով խոնավ օդի էնթալպիայի փոփոխության թվային արժեքը կմնա նույնը՝ թաքնված ջերմաքանակը հաշվի առնելու և չառնելու պարագայում:

Ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելը հնարավորություն է տալիս օգտագործել այրման արգասիքներում պարունակվող բաղադրիչ գազերի ջերմաքիմիական պարամետրերի հաշվարկման համար կիրառվող բանաձևային առնչությունները՝ փոփոխելով միայն գործակիցների համախումբը: Հաշվի առնելով, որ ջերմատեխնիկական նման հաշվարկները հիմնականում կատարվում են համակարգչային ծրագրերի կիրառմամբ, ապա այդօրինակ մոտեցումը պարզեցնում և ավելի մատչելի է դարձնում դրանց ընթացքը:

Այսպիսով, որպես իդեալական գազ ջրային գոլորշու էնթալպիայի և էնտրոպիայի հաշվարկման հիմքում ընկած է իզոբար ջերմունակության որոշման միասնական հավասարումը՝

$$\frac{c_p}{R} = \sum_{i=0}^6 a_i \tau^i + \sum_{i=7}^{12} a_i \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6}, \quad (1)$$

որտեղ $\tau = T/T^*$ -ը հարաբերական ջերմաստիճանն է, $T^* = 1000$ K, R-ը՝ ունիվերսալ գազային հաստատունը, 29.1 J/mol K, a_i -ն գործակիցների համախումբ է, որոնց թվային արժեքները բերված են աղ.1-ում:

Աղյուսակ 1

a_i մեծության թվային արժեքները

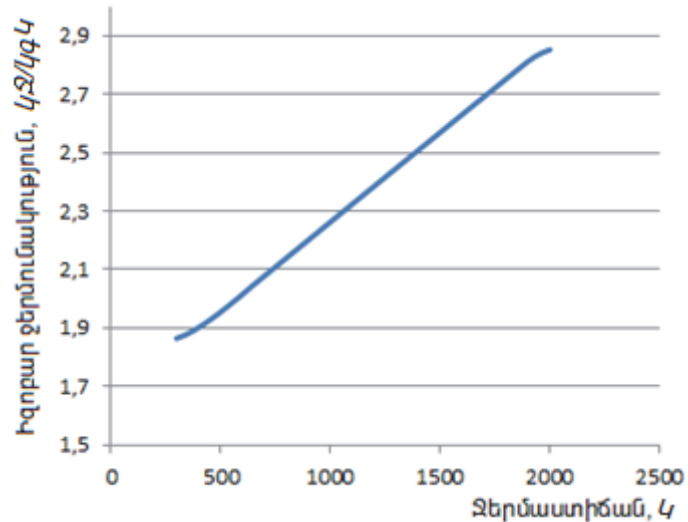
i	a_i	i	a_i
0	31,0409601236035	7	-12,0771176848589
1	-39,1422080460869	8	3,39105078851732
2	37,9695277233575	9	-0,584520979955060
3	-21,8374910952284	10	-0,0589930846488082
4	7,42251494566339	11	-0,00312970001415882
5	-1,38178929609470	12	0,0000657460740981757
6	0,108807067571454	-	-

Օգտվելով (1) արտահայտությունից՝ կառուցվել է ջերմաստիճանից ջրային գոլորշու տեսակարար իզոբար ջերմունակության կախվածությունը բնութագրող գրաֆիկը (նկ. 1):

Ջրային գոլորշու մյուս թերմոդինամիկական պարամետրերը որոշվում են՝ օգտագործելով (1) արտահայտությունը: Մասնավորապես, ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի համար կարելի է կիրառել ստորև բերված բանաձևային առնչությունը՝

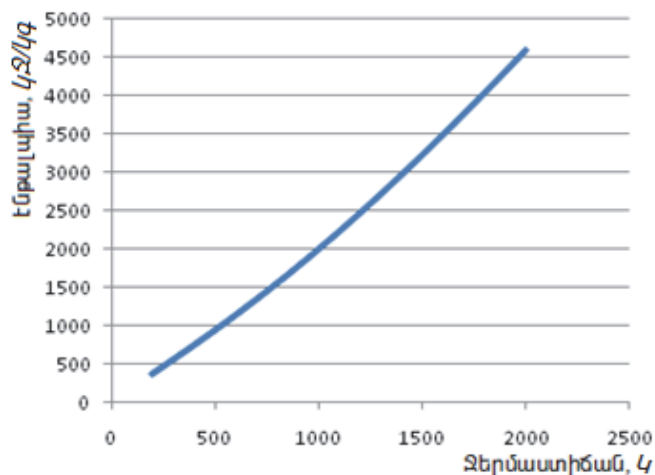
$$i' = T \left[\sum_{i=0}^6 \frac{a_i}{i+1} \tau^{i+1} + a_7 \ln(\tau) + \sum_{i=8}^{12} \frac{a_i}{7-i} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{i-7} \right] + i_{int}, \quad (2)$$

որտեղ $i' = i/R$ -ը հարաբերական տեսակարար էնթալպիան է, τ , i_{int} -ը՝ ինտեգրման հաստատունը, որի թվային արժեքը որոշվում է աղ. 2-ում բերված տվյալներով՝ (2) արտահայտության հաշվարկման արդյունքում:



Նկ. 1. Ջրային գոլորշու տեսակարար իզոբար ջերմունակության կախվածությունը ջերմաստիճանից

Օգտվելով (2) արտահայտությունից՝ կառուցվել է ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի ջերմաստիճանից կախվածությունը բնութագրող գրաֆիկը (նկ. 2):



Նկ. 2. Ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից

Որևէ P ճնշման դեպքում ջրային գոլորշու էնտրոպիայի հաշվարկման համար օգտագործվում է հետևյալ բանաձևը.

$$S = S_0 - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (3)$$

որտեղ S_0 -ն ստանդարտ էնթալպիան է $P_0=100$ կՊա ճնշման դեպքում և հաշվարկվում է ըստ ստորև բերված արտահայտության՝

$$s' = a_0 \ln(\tau) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{a_i}{i} \tau^i \right) + \sum_{i=7}^{12} \frac{a_i}{6-i} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{i-6} + S_{\text{int}}, \quad (4)$$

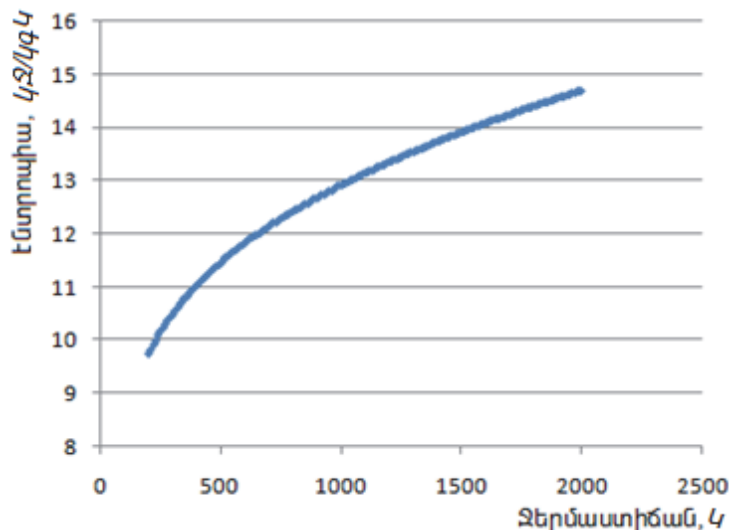
որտեղ $s' = S_0/R$ -ը հարաբերական տեսակարար էնթալպիան է, S_{int} -ը՝ ինտեգրման հաստատունը, որի թվային արժեքը ևս որոշվում է աղ. 2-ում բերված տվյալներով՝ (4) արտահայտության հաշվարկման արդյունքում:

Աղյուսակ 2

(3) բանաձևի ինտեգրման հաստատունի որոշման որոշիչ կետի տվյալները

Գազ	T, Կ	i, Ջ/մոլ	P, Պա	S, Ջ/մոլ Կ
H ₂ O	298,15	9908	101325	188,724

Օգտվելով վերը նկարագրված բանաձևային արտահայտություններից՝ նկ. 3-ում պատկերվել է ջրային գոլորշու տեսակարար էնտրոպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից, երբ ճնշումը հավասար է 100000 Պա:



Նկ. 3. Ջրային գոլորշու տեսակարար էնտրոպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից՝ 100000 Պա ճնշման պայմաններում

Մթնոլորտային խոնավ օդի էնթալպիան հաշվարկվում է որպես չոր օդի և ջրային գոլորշու էնթալպիաների գումար.

$$i_{o\eta}^h = \frac{i_{o\eta}^s + d_{o\eta} i_{H_2O}^s}{1 + d_{o\eta}}, \quad (5)$$

որտեղ $d_{o\eta}$ -ը մթնոլորտային օդի զանգվածային խոնավապարունակությունն է, h_g/h_f իսկ $i_{H_2O}^s$ -ն՝ ջրային գոլորշիների էնթալպիան, h_g/h_f :

Մթնոլորտային խոնավ օդի էնտրոպիան հավասար է մեկ ամբողջ մաս չոր օդի էնտրոպիայի և $d_{o\eta}$ ջրային գոլորշու էնտրոպիաների գումարին.

$$S_{o\eta}^h = \frac{S_{o\eta}^s + d_{\eta o} S_{H_2O}^s}{1 + d_{\eta o}}, \quad (6)$$

որտեղ $S_{o\eta}^s$ -ը և $S_{H_2O}^s$ -ն համապատասխանաբար չոր օդի և ջրային գոլորշիների էնտրոպիաներն են, h_g/h_f :

Միևնույն ժամանակ, պետք է հաշվի առնել այն հանգամանքը, որ մթնոլորտային խոնավ օդի յուրաքանչյուր բաղադրիչ գտնվում է որոշակի պարզիալ ճնշման տակ, ուստի անհրաժեշտ է նախապես հաշվարկել չոր օդի և ջրային գոլորշու պարզիալ ճնշումները ստորև բերված բանաձևերով.

$$P_{o\eta}^u = P_{o\eta} \frac{1}{1 + X_{o\eta}}, \quad (7)$$

$$P_{H_2O}^u = P_{o\eta} \frac{X_{\eta o}}{1 + X_{o\eta}}, \quad (8)$$

որտեղ $P_{o\eta}^u$ -ն և $P_{H_2O}^u$ -ն համապատասխանաբար չոր օդի և ջրային գոլորշու պարզիալ ճնշումներն են $P_{o\eta}$ մթնոլորտային ճնշման դեպքում, $X_{o\eta}$ -ը՝ մթնոլորտային օդում մոլային խոնավապարունակությունը, որը հաշվարկվում է ստորև բերված բանաձևով՝

$$X_{o\eta} = \frac{M_{o\eta}}{M_{H_2O}} d_{o\eta} 100\%: \quad (9)$$

Կատարված վերլուծությունը հնարավորություն է ընձեռում փաստել ԳՏՏ-ի ջերմային հաշվարկում ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելու դրական հանգամանքը: Մասնավորապես, այրման արգասիքներում պարունակվող բաղադրիչ գազերի թերմոդինամիկական պարամետրերի որոշման համար կարելի է կիրառել վերոնշյալ մոտեցումը և բանաձևային խումբը՝ փոփոխելով միայն գործակիցները: Նմանատիպ մոտեցումն ընդունելի է նաև ԳՏՏ-ի կոմպրեսոր մատուցվող օդի թերմոդինամիկական պարամետրերի հաշվարկման դեպքում: Վերջնարդյունքում՝ ԳՏՏ-ի ջերմային հաշվարկի իրականացման համար ստանում ենք միասնական բանաձևերի ամբողջություն, ինչը թույլ է տալիս ապա-

հովել հաշվարկների պարզեցումը՝ միաժամանակ ստանալով ելակետային ճշգրիտ արդյունքներ:

Ներկայացված բանաձևերը բավարար ճշգրտությամբ կարելի է կիրառել նաև այլ բնագավառներում, որտեղ ջրային գոլորշու պարունակությամբ աշխատող մարմինների համար կատարվում են հաշվեկշռային հավասարումների լուծումներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Release on the IAPWS Formulation-1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. International association for the properties of water and steam. – Frederica, 1996. – 18 p.
2. **Cooper J.R.** Representation of the ideal-gas thermodynamic properties of water // Int. J. Thermophys. – 1982. – № 3. – P. 35 – 43.
3. **Friedman A.S., Haar L.** High speed machine computing of ideal gas thermodynamic functions –I. isotopic water molecules // Journal of Chemical Physics. – 1954. – №22. – P. 2051 – 2058.
4. **Vidler M., Tennyson J.** Accurate partition function and thermodynamic data for water // Journal of Chemical Physics. – 2000. – T. 113, № 21. – P. 9766 – 9771.
5. **Woolley H.W.** Thermodynamic properties for H₂O in the ideal gas state. water and steam: their properties and current industrial application // Proceedings of the 9th International Conference on the Properties of Water and Steam. – New York: Pergamon Press, 1980. – P. 166 – 175.
6. **Woolley H.W.** Ideal gas thermodynamic functions for water // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1987. – № 92. – P. 35 – 51.
7. **Орлов К.А.** Исследование схем парогазовых установок на основе разработанных прикладных программ по свойствам рабочих тел: Дис. ... к.т.н. – М, 2004.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.03.2017:

Р.А. РАФЯН, В.З. МАРУХЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО
ПАРА В ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТАХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Анализируется целесообразность рассмотрения водяного пара в качестве идеального газа при определении его термодинамических свойств в тепловых расчетах газотурбинных установок. Представлены расчетные уравнения для определения термодинамических свойств водяного пара, а также энтальпии и энтропии влажного воздуха.

Ключевые слова: газотурбинная установка, компрессор, водяной пар, энтальпия, энтропия, продукты сгорания, идеальный газ.

R.A. RAFYAN, V.Z. MARUKHYAN

**DETERMINING THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF STEAM IN
THERMAL CALCULATIONS OF GAS TURBINES**

The feasibility of considering steam as an ideal gas at determining its thermodynamic properties in thermal calculations of gas turbines is analyzed. Equations for determining the thermodynamic properties of steam, as well as enthalpy and entropy of moist air are introduced.

Keywords: gas turbine, compressor, steam, enthalpy, entropy, combustion products, ideal gas.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Դ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

**ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐՈՎ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈՎԵՐՈՒՄ ԾԱՆՐ ՎԹԱՐԻ
ՆԵՐԻՐԱՆԱՅԻՆ ՓՈԽԼՈՒՄ ՋՐԱԾՆԻ ԱՅՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Հայկական ԱԷԿ-ի օրինակով ուսումնասիրվել է ծանր վթարի ներիրանային փուլում սպրինկլերային համակարգի ակտիվացման ազդեցությունը ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների վրա: Ցույց է տրվել, որ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը նպաստում է դետոնացվող գազային խառնուրդի արագ ձևավորմանը: Հետազոտության արդյունքներից ելնելով՝ առաջարկվել է ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի ներդրում և սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի ավտոմատացում՝ ըստ միջավայրում ջրային գոլորշու հարաբերական կոնցենտրացիայի:

Առանցքային բառեր. ՋՋԷՌ-440, ծանր վթար, սպրինկլերային համակարգ, ջրածնային անվտանգություն, ջրածնային վտանգ:

Ներածություն. ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով կահավորված առաջին սերնդի միջուկային էներգաբլոկների մեծ մասում դեռևս գոյություն չունեն ծանր վթարների կառավարման վերջնական ռազմավարություններ: Այդ հանգամանքը արդարացվում է դրանց նախագծային շահագործման ժամկետի ավարտով, իսկ որոշ դեպքերում էլ՝ դրանց նախագծային այնպիսի առանձնահատկությունների առկայությամբ, որոնք խիստ բարդացնում են մշակված մոտեցումների իրականացումը և ունեն լուրջ վերանայման կարիք: ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում հնարավոր ծանր վթարների դեպքում ջրածնային խնդիրը շարունակում է պահպանել իր արդիականությունը և ունի հրատապ լուծման կարիք: Խնդիրը հատկապես արդիական է ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի դեպքում, որի նախագծային շահագործման ժամկետի երկարաձգման ֆոնին առավել առաջնային է դարձել վերջինիս անվտանգության հետ կապված խնդիրների լուծումը: Ֆուկուշիմայի վթարից հետո կատարվող և պլանավորվող բոլոր միջոցառումները, կապված միջուկային էներգաբլոկների անվտանգության բարձրացման և արդիականացման հետ, իրականացվում են ջրածնային անվտանգության ապահովման համատեքստում:

Արդեն հայտնի է, որ ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի նախագծային շահագործման ժամկետը երկարաձգվելու է 10 տարով, և չի բացառվում ևս 10 տարով երկարաձգման սցենարը, որի շրջանակներում նախատեսվում է արդիականացման և անվտանգության մակարդակի անընդհատ բարձրացման հսկայածավալ աշխատանքների իրականացում: Ներկայումս ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի հերմե-

տիկ շինություններում ջրածնային անվտանգության բարձրացման խնդրինները գործնականում լուծված չեն: Նախնականորեն նախատեսվում են ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների տեղադրում, սպրինկլերային համակարգի ավտոմատ անջատման ներդրում և հերմետիկ շինության անկիպությունների լավարկում:

Ելնելով խնդրի հրատապ լուծման անհրաժեշտությունից՝ նշված աշխատանքի նպատակն է ցույց տալ և հիմնավորել սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի բացասական ազդեցությունը հիպոթետիկ ծանր վթարի ներհրանային փուլի դեպքում ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների վրա և առաջարկել դրա աշխատանքի կառավարման այնպիսի սկզբունք, որը հնարավոր ծանր վթարային սցենարի դեպքում կլինի ընդունելի՝ ինչպես ջրածնային վտանգի արդյունավետ մեղմման, այնպես էլ ռադիոակտիվ արտանետումների մակարդակի օպտիմալ նվազեցման տեսանկյուններից և հետագայում չի սահմանափակի ջրածնային վտանգի մեղմման ռազմավարությունների ներդրման հնարավորությունները:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Հաշվարկները կատարվել են ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի օրինակով՝ ջրածնային վտանգի ուսումնասիրման տեսանկյունից առավել բնութագրական համարվող վթարային սցենարների (հերմետիկ շինության ինչպես ընթացիկ կիպությունների, այնպես էլ լավարկված կիպությունների պարագայում) և սպրինկլերային համակարգի աշխատանքային տարբեր ռեժիմների դեպքում: Հետազոտվել է նաև սպրինկլերային համակարգի վաղ անջատման ազդեցությունը գազային միջավայրում ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների ձևավորման դինամիկայի տեսանկյունից: Ելնելով հոդվածի ծավալային սահմանափակումներից՝ ներկայացված են միայն 32 և 100 մմ պայմ. Տր. արտահոսքով վթարային սցենարների ուսումնասիրության արդյունքները (վթարային լրասնուցման համակարգի խափանմամբ), որոնցից առաջինը առավելագույն նախագծային վթարն է, իսկ երկրորդը՝ արտանախագծային վթարը: Ըստ կատարված ուսումնասիրությունների՝ դիտարկված վթարային սցենարները ջրածնային խնդրի ուսումնասիրության տեսանկյունից առավել բնութագրական են [1]:

Վթարային սցենարների հաշվարկային ուսումնասիրման համար օգտագործված է երկչափ MELCOR 1.8.5 հաշվարկային կոդը: Դիտարկված վթարային սցենարների դեպքում միջավայրում ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմները գնահատվել են Շապիրո Մոֆետտի եռակոմպոնենտ դիագրամների միջոցով, որոնք լայնորեն կիրառվում են ծանր վթարների դեպքում ջրածին պարունակող գազային միջավայրի պայթավտանգության գնահատման համար: Որպեսզի հնարավոր լինի գնահատել ինչպես սպրինկլերային համակարգի, այնպես էլ անկիպությունների մակարդակով պայմանավորված ազդեցությունները ջրածնային վտանգի վրա, հաշվարկները դիտարկված են ինչպես ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի ներ-

կայիս անկիպությունների, այնպես էլ լավարկված անկիպությունների պարագայում, համապատասխանաբար սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի դիտարկման և դրա անտեսման դեպքում:

Հետազոտության արդյունքների վերլուծությունը: Հետազոտության արդյունքները ցույց են տվել, որ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում հնարավոր ծանր վթարների դեպքում, սպրինկլերային համակարգի անընդհատ աշխատանքի հետևանքով, սպասվում է մթնոլորտայինից ցածր ճնշման հաստատում, որի հետևանքով հնարավոր են արտաքին միջավայրից թթվածնի ներհոսք և հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականության կորուստ: Այդ խնդրից ելնելով՝ առաջարկվել էր սպրինկլերային համակարգի ավտոմատ անջատման ներդրում, երբ ճնշումը մոտենում է մթնոլորտայինից ցածր շեմին [2]: Մեկ այլ ուսումնասիրության արդյունքում ցույց էր տրվել, որ ծանր վթարի զարգացման արտադրանային փուլում հիմնական գործոնը, ինչը ազդում է միջավայրի դետոնացման վտանգի վրա, թթվածնի կուտակումն է, որն էլ պայմանավորված էր սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով [3]:

Հաշվարկներում առավել բնութագրական արդյունքների ստացման նպատակով դիտարկվել են 4 տարրեր դեպքեր: Ստորև ներկայացված են 32 և 100 մմ պայմ. տր. արտահոսքով վթարային սցենարների դեպքում միջավայրի կազմի փոփոխության կորերը Շապիրո Մոֆետտի եռակոմպոնենտ դիագրամների միջոցով: Դեպք 1-ը և 2-ը համապատասխանում են (անկիպությունների ընթացիկ պայմաններում) սպրինկլերային համակարգի խափանմամբ և դրա աշխատանքային վիճակով ուղեկցվող վթարային սցենարներին, իսկ դեպք 3-ը և 4-ը՝ սպրինկլերային համակարգի խափանմամբ և դրա աշխատանքային վիճակով ուղեկցվող վթարային սցենարներին (լավարկված անկիպությունների պայմաններում):

Միջավայրի կոնցենտրացիոն կազմի փոփոխության մոդելավորման համար օգտագործվել են ստորև ներկայացված իդեալական գազերի հայտնի հավասարումները: Իդեալական գազային խառնուրդի առանձին բաղադրիչների հարաբերական կոնցենտրացիաները որոշվել են հետևյալ բանաձևով.

$$\varphi_i = P_i / P, \quad (1)$$

որտեղ P_i -ն համապատասխան գազային բաղադրիչի պարգիալ ճնշումն է $[Pa]$, P -ն՝ գազային խառնուրդի ճնշումը $[Pa]$:

Իդեալական գազային խառնուրդի ճնշումը որոշվել է հետևյալ բանաձևով.

$$P = P_{գոլորշի} \left(\rho_{գոլորշի} T \right) + \sum_{i=1}^N (M_i R_i T) / V, \quad (2)$$

որտեղ $P_{գոլորշի}$ -ն ջրային գոլորշու պարգիալ ճնշումն է $[Pa]$, $\rho_{գոլորշի}$ -ն՝ գոլորշու խտությունը $[kg/m^3]$, N -ը՝ չկոնդենսացող գազերի թիվը, R_i -ը՝ առանձին կոմպո-

նենտների գազային հաստատունը, T -ն՝ դիտարկվող ծավալում գազային խառնուրդի բացարձակ ջերմաստիճանը [Կ], V -ն՝ խառնուրդի ծավալը [մ³]:

Գոլորշու խտությունը որոշվել է հետևյալ պարզ բանաձևից.

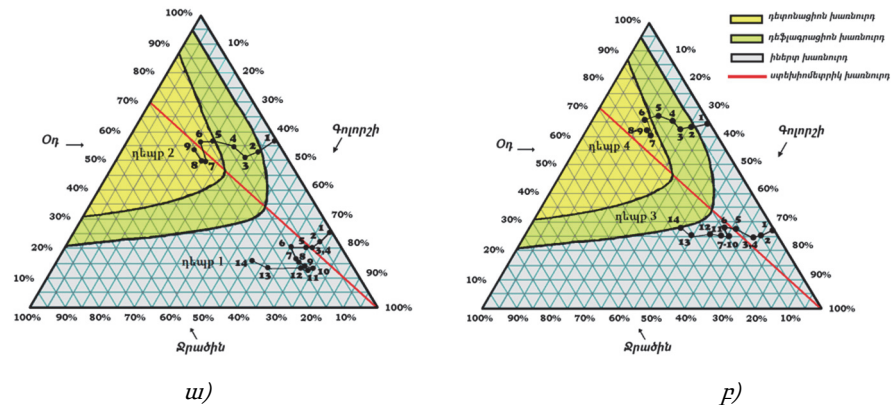
$$\rho_{\text{գոլորշի}} = M_{\text{գոլորշի}} / V, \quad (3)$$

որտեղ $M_{\text{գոլորշի}}$ – ն ջրային գոլորշու զանգվածն է [կգ]:

Խառնուրդի առանձին բաղադրիչների ճնշումը որոշվել է հետևյալ բանաձևով.

$$P_i = (M_i R_i T) / V: \quad (4)$$

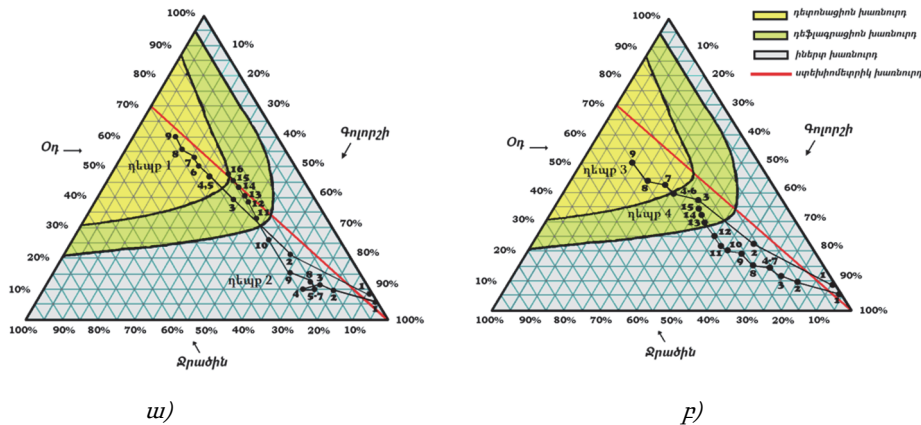
Ստորև ներկայացված գրաֆիկներում ժամանակի սկզբնապահը համապատասխանում է ջրածնի գեներացիայի պահին, իսկ միջավայրի կազմը որոշող կետերը վերցված են յուրաքանչյուր 20 *բոպե* հաճախականությամբ:



Նկ. 1. 32 մմ պայմանական տրամագիծ արտահոսքով վթարային սցենարի դեպքում՝ ա- դեպք 1 և 2, բ- դեպք 3 և 4

Նկ. 1-ում բերված գրաֆիկներից ակնհայտ է դառնում, որ անկիպությունների լավարկումը էականորեն չի ազդում ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների վրա, իսկ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը նպաստում է միջավայրում այրվող գազային խառնուրդի արագ ձևավորմանը: Ջրածնի գեներացիայի սկզբից արդեն 20 *բոպե* հետո սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով ուղեկցվող երկու դեպքերում էլ (նկ.1-ի ա և բ, դեպք 2 և 4) միջավայրի վիճակը մոտ է գտնվել դեֆլազացիոն այրման և իներտ տիրույթի սահմանային կորին, իսկ մոտ 100 *բոպե* հետո դիտվել է դետոնացիոն խառնուրդի առաջացումը, ինչը ուղղակիորեն կարող է սպառնալ հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը:

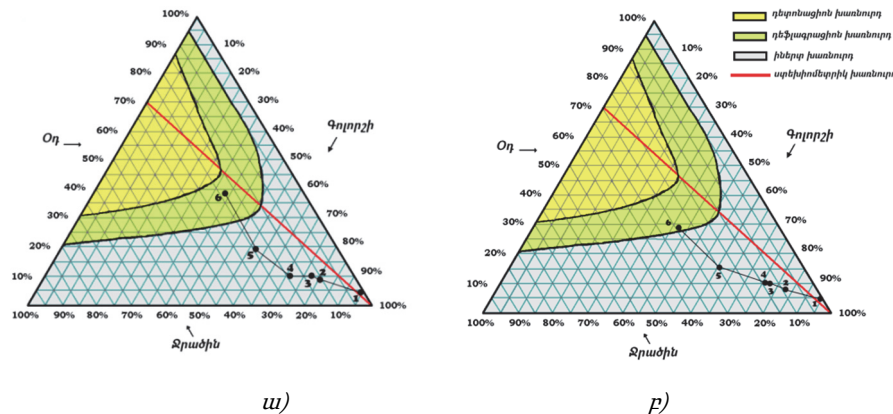
Պատկերը համանման է նաև 100 մմ պայմ. տր. արտանախագծային վթարային սցենարի դեպքում (նկ.2):



Նկ. 2. 100 մմ պայմանական տրամագիծ արտահոսքով վթարային սցենարի դեպքում՝
ա- դեպք 1 և 2, բ- դեպք 3 և 4

Սպրինկլերային համակարգի աշխատանքն այս դեպքում ևս նպաստում է դետոնացիոն խառնուրդի արագ ձևավորմանը: Պայմանավորված ջրածնի առաջացման ավելի մեծ ինտենսիվությամբ՝ այս սցենարի դեպքում միջավայրում ջրածնի և շոգեօդային խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորումն ավելի ինտենսիվ է տեղի ունենում, քան նախորդ վթարային սցենարի դեպքում:

Նկ. 3-ում ներկայացված է 100 մմ պայմ. տր. արտահոսքով վթարային սցենարի դեպքում սպրինկլերային համակարգի 1000 լ ուշ անջատման ազդեցությունը միջավայրի կազմի փոփոխության և սպասվող այրման ռեժիմների վրա:



Նկ.3. 100 մմ պայմանական տրամագիծ արտահոսքով վթարային սցենարով միջավայրի կազմի փոփոխությունը՝ անկիպությունների լավարկված արժեքով. ա. սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը դադարեցվել է 5000 լ հետո, բ. սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը դադարեցվել է 4000 լ հետո

Նկ. 3-ում բերված դիագրամներից ակնհայտ է դառնում, որ սպրինկլերային համակարգի ընդամենը 1000 չ/ուշ ակտիվացումը զգալիորեն մեծացնում է միջավայրի իներտության պաշարը, և միջավայրի կազմը համապատասխանում է ոչ թե այրվող, այլ իներտ և դեֆլագրացիոն խառնուրդի սահմանային տիրույթին: Այս հանգամանքը թույլ է տալիս եզրակացնել, որ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի ճիշտ կառավարումը կարող է զգալիորեն ազդել միջավայրի պայթավտանգ կազմի ձևավորման պրոցեսների վրա և հեշտացնել ծանր վթարի կառավարման խնդիրը հատկապես ջրածնային անվտանգության ապահովման համատեքստում: Այս հանգամանքը թույլ է տալիս եզրակացնել նաև, որ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը պետք է «զգուշորեն» կառավարել ծանր վթարի զարգացման ողջ ընթացքում:

Ջրածնային վտանգի մեղմման համակարգի ներդրումից առաջ հարկավոր է էներգաբլոկը համալրել ջրածնի մոնիտորինգի համակարգով, որը կապահովի ծանր վթարի ընթացքում միջավայրի կազմի, մասնավորապես թթվածնի և ջրածնի, ծավալային կոնցենտրացիաների վերաբերյալ տվյալների հասանելիությունը: Այս համակարգի աշխատանքը պետք է ինտեգրված լինի սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի հետ, հակառակ դեպքում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը ուղղակիորեն կհակասի ջրածնային անվտանգության ապահովման սկզբունքներին, ինչը լուրջ վտանգ է հերմետիկ շինության ամբողջականության պահպանման հարցում: Գերմանական «AREVA» կազմակերպության կողմից մշակվել են «HERMETIS» անվանումը ստացած լիարժեք մոնիտորինգի համակարգեր, որոնք կարող են տրամադրել բավարար տեղեկություն հերմետիկ շինության ներսում գազային կազմի ընթացիկ փոփոխությունների, ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների և մի շարք կարևոր պարամետրերի վերաբերյալ, որոնք անհրաժեշտ են ծանր վթարների կառավարման ռազմավարությունների ճիշտ իրագործման համար [4]: Դիտարկվող և նմանատիպ էներգաբլոկների դեպքում ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի առավել նպատակային բնութագրերի ընտրության վերաբերյալ ուսումնասիրության արդյունքները կներկայացվեն մեկ այլ աշխատանքի շրջանակներում:

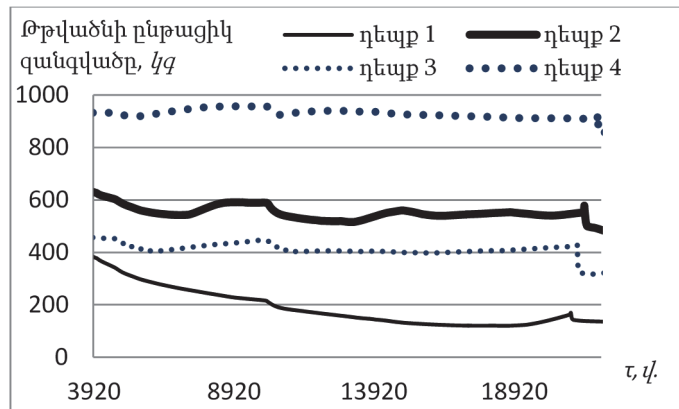
Ելնելով կոնսերվատիվ մոտեցման սկզբունքից, որպեսզի սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը չհանգեցնի հակառակ էֆեկտի ջրածնային անվտանգության տեսանկյունից, միջավայրում հետևյալ պայմաններից յուրաքանչյուրի հաստատման դեպքում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը պետք է ավտոմատ կերպով ընդհատվի.

$$\varphi_{գոլորշի} \leq 60\% \text{ կամ } P \leq 1 \text{ մթն:}$$

Առաջին պայմանի դեպքում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի հետևանքով մեծանում է այրվող խառնուրդի ձևավորման վտանգը, իսկ երկրորդի դեպքում՝ արտաքին միջավայրից թթվածնի ներհոսքի վտանգը, ինչը խիստ կբարդացնի ջրածնի կառավարման խնդիրը: Սա նշանակում է, որ սպրինկլերային համակարգը կաշխատի ոչ թե անընդհատ (ներկա դրությամբ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը հիմնված է միանգամյա ակտիվացման սկզբունքի վրա, այսինքն՝ վերջինիս ակտիվացման դեպքում չի ենթադրվում օպերատորի միջամտություն կամ դրա աշխատանքի կարգավորում), այլ ընդհատումներով: Սա, իհարկե, կհանգեցնի արտանետումների որոշակի չափի ավելացմանը՝ ի հաշիվ ջրածնի բռնկման վտանգի նվազեցման:

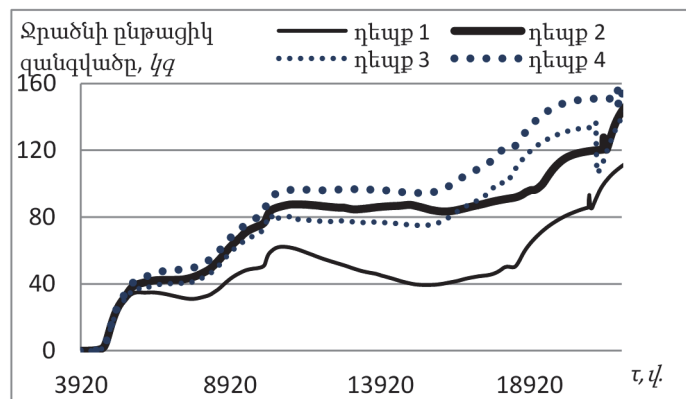
Անկիպությունների լավարկման և սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով պայմանավորված հնարավոր բացասական ազդեցությունները ջրածնի և թթվածնի կուտակման պրոցեսների վրա գնահատելու համար նկ.4-ում և 5-ում ներկայացված են համապատասխանաբար ջրածնի և թթվածնի զանգվածների փոփոխության դինամիկան արտահայտող հաշվարկների գրաֆիկական արդյունքները ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի շոգեգեներատորների կիսաձավալի դեպքում: Ելնելով ծավալային սահմանափակումներից՝ ներկայացված են միայն առավելագույն նախագծային վթար համարվող 32 մ/ժ պայմ. տր. արտահոսքով վթարային սցենարի գրաֆիկական արդյունքները:

Նկ.4-ից և 5-ից պարզ է դառնում, որ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի ազդեցությունը թթվածնի և ջրածնի կուտակման երևույթի վրա ունի անհամեմատ ավելի մեծ ազդեցություն, քան անկիպությունների լավարկման գործոնը: Դիտարկված ժամանակային տիրույթում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով ուղեկցվող վթարային սցենարի դեպքում թթվածնի կուտակման չափը խիստ տարբեր է՝ կախված դիտարկվող դեպքից: Ակնհայտ է, որ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով ուղեկցվող սցենարների դեպքում (նկ.4,5, դեպք 2,4) ջրածնի և թթվածնի կուտակման էֆեկտը չափազանց զգալի է: Նկ.4-ից և 5-ից ակնհայտ է դառնում, որ անկիպությունների լավարկումը նպաստում է դիտարկվող ծավալում թթվածնի մինչև 3 անգամ և ջրածնի մինչև 2 անգամ ավել կուտակմանը, իսկ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը՝ համապատասխանաբար թթվածնի մինչև 7,5 անգամ և ջրածնի մինչև 2,3 անգամ ավել կուտակմանը:



Նկ.4. Թթվածնի քանակության փոփոխությունը դիտարկված վթարային սցենարների դեպքում

Պետք է նշել, որ չնայած այն սցենարներում, որոնց դեպքում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը չի դիտարկվել, միջավայրի կազմի իներտության պաշարը անհամեմատ մեծ է (պայմանավորված է ջրային գոլորշու բարձր կոնցենտրացիայով), սակայն արտանետումների մակարդակի նվազեցման և ռադիոկատիվ աերոզոլների նստեցման տեսանկյունից սպրինկլերային համակարգի աշխատանքն ունի խիստ կարևոր նշանակություն և ներկայումս այլընտրանք չունի: Կարելի է վստահորեն պնդել, որ հնարավոր ծանր վթարային սցենարի դեպքում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը գործող ձևաչափով անհամատեղելի է ջրածնային անվտանգության ապահովման հետ, և հետևաբար՝ դրա աշխատանքի սկզբունքի վերանայման լուրջ անհրաժեշտություն կա:



Նկ.5. Ջրածնի քանակության փոփոխությունը դիտարկված վթարային սցենարների դեպքում

Սպրինկլերային համակարգի աշխատանքը կարելի է դադարեցնել միայն ֆիլտրող արտանետման համակարգի առկայության դեպքում, ինչը ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի դեպքում և նմանատիպ կայաններում գոյություն չունի: Սա թույլ կտա նաև, մինչև ջրածնի գեներացիայի պահը, միջավայրից հեռացնել թթվածնի զգալի մասը, որը մտնում է ջրածնային վտանգի մեղմման հնարավոր ռազմավարությունների մեջ և կդիտարկվի մեկ այլ աշխատանքի շրջանակներում: Այս եղանակը պետք է դիտարկել որպես ջրածնային վտանգի մեղմման հնարավոր ռազմավարությունները փոխլրացնող միջոց: Աշխարհի շատ երկրներում ֆիլտրվող արտանետման համակարգերը հաջողությամբ կիրառվում են որպես սպրինկլերային համակարգի այլընտրանք (նմանատիպ համակարգեր տեղադրված են աշխարհի ավելի քան 50 միջուկային էներգաբլոկներում և կարող են ապահովել մինչև 99,5...99,99 % ռադիոակտիվ աերոզոլների և յոդի որսում):

Եզրակացություն. Հիմնվելով կատարված հաշվարկների արդյունքների վերլուծության վրա՝ կարելի է կատարել հետևյալ հիմնական եզրակացությունները.

1. Առավելագույն նախագծային վթարի և միջին արտահոսքով արտանախագծային վթարների դեպքում ծանր վթարի զարգացման ներհրանային փուլում սպրինկլերային համակարգի ակտիվացումը նպաստում է միջավայրում ջրածնի և թթվածնի վտանգավոր կուտակմանը և դետոնացվող խառնուրդի արագ ձևավորմանը, ինչը կարող է սպառնալ հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը:

2. Անկիպությունների մակարդակի բարելավումը, որը հանգեցնում է հերմետիկ ծավալներում ջրածնի և թթվածնի զգալի կուտակմանը, անցանկալի ազդեցություն չի ունենում ջրածնի սպասվող այրման ռեժիմների ձևավորման վրա և չի հակասում ջրածնային անվտանգության ապահովման խնդրին:

3. Ծանր վթարի զարգացման ներհրանային փուլում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի ավտոմատացումը՝ ըստ միջավայրում ջրային գոլորշու հարաբերական կոնցենտրացիայի, թույլ կտա նվազեցնել ջրածնի դետոնացիոն այրման վտանգը և հեշտացնել ջրածնային անվտանգության ապահովման խնդիրները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Պետրոսյան Վ.Գ., Եղոյան Է.Ա., Գրիգորյան Ա.Դ. Ջրածնային վտանգը ՋՋԷԴ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի դեպքում // ՀԱՊՀ ԼՐԱԲԵՐ. - 2016. - №2. - էջ 547-554:
2. Петросян В.Г., Оганесян О.А. Исследование функционирования насосов систем безопасности энергоблока №2 Армянской АЭС при проектной аварии // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - 2015. - Т. LXVIII, N 1. - С.-27-35.

3. **Գրիգորյան Ա.Դ.** Ծանր վթարի արտափրանային փուլում պայթավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման վտանգի գնահատումը ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում // ՀՃԱԼ.-2017- Հ.14, №1.-էջ 76-79:
4. Multi-Functional Containment Atmosphere Monitoring System HERMETIS-
http://us.areva.com/canada/liblocal/docs/269-HERMETIS_en-Web.pdf

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 21.04.2017:

В.Г. ПЕТРОСЯН А.Д. ГРИГОРЯН

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В ЭНЕРГБЛОКАХ С РЕАКТОРОМ ВВЭР-440 ПРИ ВНУТРИКОРПУСНОЙ СТАДИИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

На примере Армянской АЭС исследовано воздействие активации спринклерной системы на ожидаемые режимы горения водорода на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии. Показано, что работа спринклерной системы способствует быстрому образованию детонационной газовой смеси. Исходя из результатов исследования, предложено внедрить систему мониторинга водорода и автоматизировать работу спринклерной системы с учетом относительной концентрации водяного пара в атмосфере.

Ключевые слова: ВВЭР-440, тяжелая авария, спринклерная система, водородная безопасность, водородная угроза.

V.G. PETROSYAN A.D. GRIGORYAN

ANALYSIS OF THE HYDROGEN COMBUSTION REGIMES AT NUCLEAR POWER UNITS WITH THE WVER-440 REACTOR AT AN IN-VESEL STAGE OF A SEVERE ACCIDENT

Based on the Armenian NPP example, the influence of activation of the spray system on the expected hydrogen combustion regimes at an in-vessel stage of a severe accident is investigated. It is shown that the operation of the spray system promotes the rapid formation of a detonation gas mixture. Based on the results of the study, it is proposed to implement a hydrogen monitoring system, and automate the operation of the spray system taking into account the relative concentration of water vapor in the atmosphere.

Keywords: WVER-440, severe accident, spray system, hydrogen safety, hydrogen threat.

К.А. АВЕТИСЯН, Г.П. ВАРДАНЯН, Г.Г. КИРАКОСЯН, В.Г. ХАЧАТУРЯН,
Ж.Р. ПАНОСЯН, Л.Г. КИРАКОСЯН, Дж.С. СЕВОЯН

УПРАВЛЕНИЕ ГЕЛИОТРЕКЕРОМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Разработаны аппаратное исполнение и программное обеспечение управления гелиотрекером. Предложен метод оптимальной ориентации солнечной панели на максимальный поток солнечного излучения с целью обеспечения наибольшей эффективности работы солнечных энергоустановок.

Ключевые слова: солнечная панель, гелиотрекер, солнечная энергоустановка, датчик, фоторезистор, сервомотор, платформа Arduino.

Введение. Использование солнечных энергоустановок (СЭУ), пользующихся большим спросом на протяжении последних десятилетий [1], является важным решением в области энергосбережения в странах с высокой плотностью солнечного излучения. Повышение стоимости традиционных ископаемых источников энергии, вызванное их истощением и усложнением технологии добычи, делает экономически выгодным использование СЭУ в больших масштабах.

Достоинствами СЭУ являются: сравнительно высокая надежность, отсутствие расходов на топливо, постоянное повышение эффективности за счет наличия гелиотрекера, отсутствие опасных загрязнителей и отходов.

К серьезным недостаткам использования СЭУ на сегодняшний день относится относительно высокая стоимость получаемой электроэнергии по сравнению с традиционными источниками [2,3]. Это вызвано невысокой плотностью и непостоянством во времени энергетических потоков, что требует использования дорогостоящего оборудования для сбора, аккумулирования и преобразования энергии. Однако в последнее время научные достижения в области технологии и рост масштабов производства СЭУ обеспечивают тенденцию снижения стоимости солнечной электроэнергии [3].

Важным фактором оптимального рабочего режима работы СЭУ является ориентация солнечных панелей по направлению к источнику энергии – Солнцу.

В данной работе предлагается один из методов управления гелиотрекером, основанный на использовании датчика, ориентирующего поверхность солнечной панели на максимальный поток солнечного излучения.

Модель гелиотрекера. На сегодняшний день существует большое количество способов реализации гелиотрекером и принципов их работы. Гелиотрекеры состоят из трех основных блоков: датчика ориентации, контроллера

обработки сигнала датчика для формирования управляющего сигнала привода поворотного устройства и самого привода поворотного устройства. Структурная схема гелиотрекера приведена на рис.1

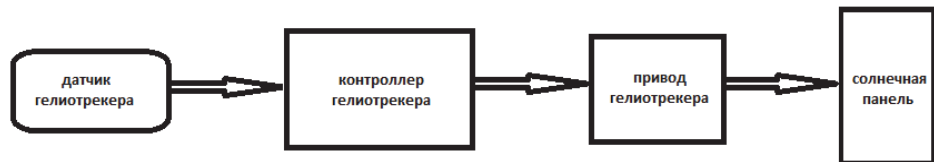


Рис. 1. Структурная схема гелиотрекера

Существует множество способов управления гелиотрекерами в зависимости от обеспечивающих воздействие устройств. Одним из таких устройств являются датчики, которые, в свою очередь, различаются чувствительными элементами.

Датчик гелиотрекера представляет собой небольшую плату с укрепленными на ней чувствительными элементами – четырьмя фоторезисторами. Фоторезисторы разделены между собой перпендикулярной к основанию крестообразной перегородкой (рис. 2). Датчик ориентируется строго по азимуту – восток, запад.

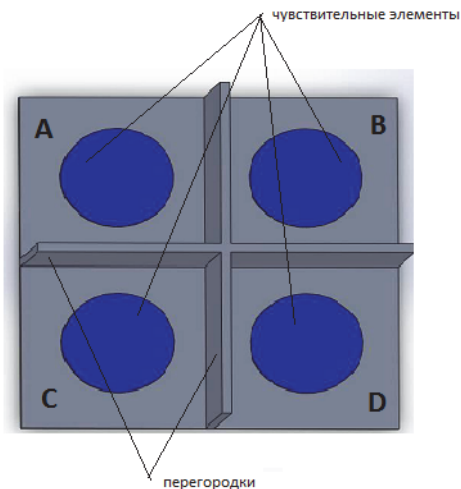


Рис. 2. Датчик гелиотрекера

При ориентации на Солнце оптимальное целевое положение солнечной панели соответствует случаю, когда освещены все четыре фоторезистора. Перемещение положения Солнца на небосводе сказывается на изменении освещенности чувствительных элементов датчика, некоторые фоторезисторы оказываются в тени.

Система управления контроллером гелиотрекера реализуется на базе платформы Arduino. Экспериментальная модель контроллера системы управления гелиотрекером показана на рис. 3.

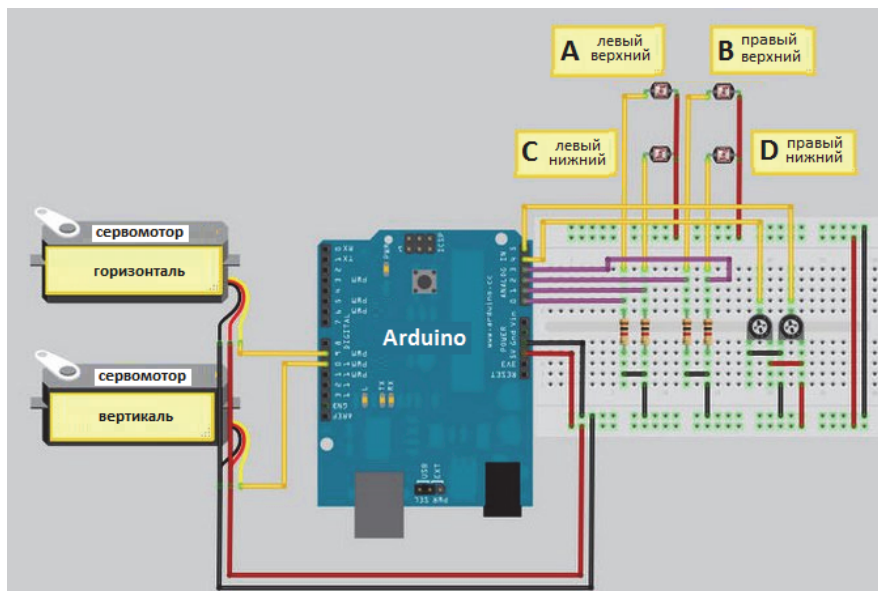


Рис. 3. Экспериментальная модель управления гелиотрекером

Принцип управления гелиотрекером заключается в следующем: датчик реагирует на изменение положения Солнца на небе и в зависимости от освещенности чувствительных элементов – фоторезисторов подает соответствующие сигналы на вход контроллера гелиотрекера. Фоторезисторы датчика гелиотрекера А, В, С и D подключаются к аналоговым входам платформы Arduino – соответственно к выводу 0, к выводу 2, к выводу 1, к выводу 3.

Контроллер гелиотрекера обрабатывает полученные данные по заданному алгоритму и, при необходимости, выдает команду на привод поворотного устройства гелиотрекера. Привод поворотного устройства гелиотрекера ориентируется согласно оси эклиптики. Сервомоторы горизонтального и вертикального поворотов соответственно подключены к цифровым выводам 9 и 10.

В таблице приведены возможные варианты освещенности чувствительных элементов датчика, где через "1" обозначена освещенность фоторезистора, а через "0" - нахождение фоторезистора в тени.

Любые комбинации с условиями А="1" и С="1", так же, как и эклиптики В="1" и D="1", невозможны. Каждой комбинации сигналов, поступивших на контроллер от датчика, соответствует команда управления приводом поворотного устройства.

Таблица

Возможные варианты освещенности чувствительных элементов датчика

Элемент A	1	0	1	0	0
Элемент B	0	1	1	0	0
Элемент C	0	0	0	1	0
Элемент D	0	0	0	0	1
Положение яркого пятна	выше и западнее	выше и восточнее	выше	ниже и восточнее	ниже и восточнее
Команда поворотному устройству по горизонтальной оси	вверх	вверх	вверх	вниз	вниз
Команда поворотному устройству по вертикальной оси	на запад	на восток	стоять	на восток	на запад

Управляющая программа для микроконтроллера. Ниже представлен текст программы управления гелиотрекером, обеспечивающей выполнение представленного в таблице алгоритма на языке СИ в среде IDE Arduino.

```
#include <Servo.h> //включить библиотеку сервомотора
```

```
Servo horizontal; // горизонтальный сервомотор
intservoh = 90; //
```

```
Servo vertical; // вертикальный сервомотор
intservov = 90; //
```

```
// расположение выводов фоторезисторов
// имя = аналоговый вывод;
intldrlt = 0; //верхний слева фоторезистор
intldrrt = 1; //верхний справа фоторезистор
intldrld = 2; //нижний слева фоторезистор
intldrrd = 3; // нижний справа фоторезистор
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  // соединения сервомоторов
  //подключено к выводу(номер вывода);
  horizontal.attach(9);
  vertical.attach(10);
}
```

```
void loop()
{
  intlt = analogRead(ldrlt); // верхний слева
```



```

intrt = analogRead(ldrrt); // верхний справа
intld = analogRead(ldrld); // нижний слева
intrd = analogRead(ldrrd); // нижний справа

intdtime = analogRead(4)/20; // чтение потенциометра
inttol = analogRead(5)/4;

intavt = (lt + rt) / 2; // среднее значение токов верхних фоторезисторов
intavd = (ld + rd) / 2; // среднее значение токов нижних фоторезисторов
intavl = (lt + ld) / 2; // среднее значение токов левых фоторезисторов
intavr = (rt + rd) / 2; // среднее значение токов правых фоторезисторов

intdvert = avt - avd; // проверить разность токов между верхними и нижними
фоторезисторами
intdhoriz = avl - avr; // проверить разность токов между левыми и правыми
фоторезисторами

if (-1*tol>dvert || dvert>tol) // проверить, находится ли разность токов внутри
допуска
{
if (avt>avd)
{
servov = ++servov;
if (servov> 180)
{
servov = 180;
}
}
else if (avt<avd)
{
servov= --servov;
if (servov< 0)
{
servov = 0;
}
}
vertical.write(servov);
}

if (-1*tol>dhoriz || dhoriz>tol) // проверить, находится ли разность токов
внутри допуска
{

```

```

if (avl>avr)
{
servoh = --servoh;
if (servoh< 0)
{
servoh = 0;
}
}
else if (avl<avr)
{
servoh = ++servoh;
if (servoh> 180)
{
servoh = 180;
}
}
else if (avl == avr)
{
// ничего не изменять
}
horizontal.write(servoh);
}
delay(dtime);
}

```

Заключение. Построена модель гелиотрекера и выполнены испытания его макета, по результатам которых проведена оптимизация конструкции гелиотрекера. Разработанная система управления гелиотрекером позволяет произвести более оптимальную генерацию энергии не только в течение дня, но и на протяжении всего года.

Работа выполнена в рамках проекта DesIRE, Tempus.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Buresch M.** Photovoltaic energy systems design and installation. - New York: McGraw-Hill, 1993. – 758p.
2. **Վարդանյան Գ.Պ.** Արևային ֆոտոէլեկտրական մոդուլների և ֆրենելային խտարարների մակերեսների մաքրող սարքերի մշակում // Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Տեղեկագիր. Տեխն.գիտ.սերիա: - 2016.- Հ.LXIX, N2.- էջ 131-137:

3. **Kirakosyan G.H., Ayvazyan G.Y., Barseghyan R.N.** Modeling, simulation and optimization of PV pumping system // Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2006. – V.3, N4. – P. 645-652.
4. **Киракосян Г.Г., Аветисян К.А., Конджорян А.А., Киракосян Л.Г.** Моделирование и конструирование следящей системы за точкой максимальной мощности на основе нечеткой логики для солнечных энергетических установок // Вестник Инженерной академии Армении.-2014.-Т.11, N 1.- С. 135-141.
5. **Վարդանյան Գ.Պ., Փանոսյան Ժ.Ռ., Սևոյան Զ.Ս.** Կարկուտից պաշտպանված արևային լուսաէլեկտրական արդյունավետ մոդուլի պատրաստման նոր տեխնոլոգիա // Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Տեղեկագիր. Տեխն.գիտ.սերիա: - 2016.- Հ.LXIX, N4.- էջ 354-362:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.05.2017:

**Կ.Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Գ.Պ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Գ.Գ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ,
Վ.Գ. ԽԱՉԱՏՈՒՐՅԱՆ, Ժ.Ռ. ՓԱՆՈՍՅԱՆ, Լ.Գ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Զ.Ս. ՍԵՎՈՅԱՆ**

**ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԱՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ
ԱՐԵՎԱԿԱՆԱՀԵՏԱԳԾԱՅԻՆ ՍԱՐՔՈՎ**

Մշակվել են արեգակնահետազոյային սարքով կառավարվող ապարատ և ծրագրային ապահովում: Առաջարկվել է արեգակի ճառագայթների առավելագույն հոսքի նկատմամբ արևային պանելի օպտիմալ կողմնորոշման մեթոդ:

Առանցքային բառեր: արևային պանել, արեգակնահետազոյային սարք, արևային էներգատեղակայանք, տվիչ, ֆոտոռեզիստոր, օժանդակ շարժիչ, Արդյուինոյի հեռահարթակ:

**K.A. AVETISYAN, G.P. VARDANYAN, G.G. KIRAKOSYAN,
V.G. KHACHATURYAN, ZH.R. PANOSYAN, L.G. KIARKOSYAN, J.S. SEVOYAN**
CONTROLLING THE SOLAR POWER PLANT BY A HELIOTRACKER

The hardware and software for controlling by a heliotracker are developed. A method for optimal orriertation of a solar panel on the maximal flow of the solar radiation is proposed to ensure the highest efficiency of the operation of solar power plants.

Keywords: solar panel, heliotracker, solar power plant, sensor, photoresistor, servomotor, arduino platform.

Ս.Հ. ԷԼԲԱԿՅԱՆ

ԱՅՐԻՉՆԵՐԻ ՀԱՐՄԱՐԱԴԱՍՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԶՈՏԻ ԹԵՐՄԻԿ
ՕՔՍԻԴԱՆՏԻ ԵԼՔԻ ՎՐԱ

Այրիչների տիպային դասավորվածությունը էական ազդեցություն ունի ազոտի օքսիդների ելքի վրա՝ պայմանավորված հնոցային խցում ջերմանջատման, այրման արգասիքներով հնոցային տարածության լցվածության և ջերմազանգվածափոխանակության պայմանների փոփոխությամբ: Նպատակ ունենալով գնահատելու այրման արգասիքներում պարունակվող ազոտի օքսիդների քանակությունը այրիչների տարբեր հարմարադասման դեպքում՝ մշակվել են հաշվարկային ալգորիթմ և համապատասխան բլոկ-սխեմա: Գնահատվել է նաև ջահի հովացման արագության ազդեցությունը ազոտի թերմիկ օքսիդների ելքի վրա:

Առանցքային բառեր. ազոտի թերմիկ օքսիդներ, այրիչների ճակատային հարմարադասում, այրիչների հատակային հարմարադասում, այրման ակտիվ գոտի, ջահի հովացման արագություն:

ՋԷԿ-երի ծխագազերում պարունակվող վնասակար միացություններով շրջակա միջավայրին հասցված վնասը նվազեցնելու համար անհրաժեշտ է իրականացնել վառելիքի ավանդական այրման գործընթացի որոշակի վերափոխում: Մասնավորապես, ազոտի օքսիդների ելքի նվազեցման առավել նպատակային և տնտեսավետ տարբերակ է վառելիքի այրման ռեժիմատեխնոլոգիական գործընթացի ճիշտ կազմակերպման շնորհիվ դրանց ելքի ճնշումը [1]: Հեղուկ և գազային վառելիքների այրման դեպքում, դեպի շրջակա միջավայր արտանետվող ազոտի օքսիդների կրճատման նպատակով, ներկայումս կիրառվող ամենաարդյունավետ միջոցառումներից են.

- ✓ այրման գործընթացի կազմակերպումը օդի ավելցուկի գործակցի փոքր արժեքների դեպքում,
- ✓ երկ-, եռաստիճան այրման կազմակերպումը,
- ✓ ծխագազերի վերաշրջանառությունը,
- ✓ այրման ակտիվ գոտի խոնավության կամ շոգու մատուցումը,
- ✓ հնոցային ծավալում այրման ակտիվ գոտու (ԱԱԳ) կենտրոնացումը և ջահի հովացման արագության մեծացումը:

Միաժամանակ ապացուցված է, որ ազոտի օքսիդների ելքի նվազման նպատակով իրականացվող ռեժիմատեխնոլոգիական որոշ միջոցառումներ (մասնավորապես հնոցում օդի ավելցուկի գործակցի նվազեցումը, աստիճանական այրման

գործընթացի սխալ կազմակերպումը) մեծացնում են հեռացող ծխագազերում թերայրման արգասիքների (ածխածնի մոնօքսիդի և բենզապիրենի) ի հայտ գալու հավանականությունը, ուստի միջոցառման ընտրությունը և տեխնոլոգիական իրականացումը պետք է լինեն ճիշտ կազմակերպված և վերահսկելի [2]:

Ծխագազերի վերաշրջանառության արդյունքում ազոտի օքսիդների արտանետումների կրճատման արդյունավետությունը էապես կախված է վերաշրջանառվող ծխագազերի քանակությունից, դրանց ջերմաստիճանից, ինչպես նաև ջահում այրման արգասիքների հետ խառնման ինտենսիվությունից, դեպի հնոց մատուցման ձևից և այրիչում վերաշրջանառվող գազերի և օդի արագությունների հարաբերակցությունից:

Այրման ակտիվ գոտի խոնավության կամ շոգու մատուցումը (որպես կանոն, վառելիքի ծախսի 5...8%-ի չափով) նվազեցնում է ազոտի օքսիդների արտանետումները 15...30%-ով, սակայն հանգեցնում է շոգեկաթսայի օ.գ.գ.-ի 0,5...1%-ով փոքրացման: Չնայած կարգավորման դյուրինությանը, պարզությանը և կապիտալ նվազ ծախսերին՝ այս մեթոդը նպատակահարմար է իրականացնել անբարենպաստ օդերևութաբանական պայմանների դեպքում կամ վթարային իրավիճակներում:

Հնոցային ծավալում այրման ակտիվ գոտու կենտրոնացումը կատարվում է ի հաշիվ այրիչների հարմարադասման: Շարադրվածն առավելապես վերաբերում է այրիչների տիպային դասավորվածության դեպքում հնոցային խցում ջերմանջատման, այրման արգասիքներով հնոցային տարածության լցվածության և ջերմազանգվածափոխանակության պայմաններին [3]: Վերջին հաշվով այս գործոններն են պայմանավորում ազոտի օքսիդների քանակական ելքը:

Ստորև ներկայացված են (աղյուսակ) այրիչների տիպային հարմարադասման ընդհանրական բնութագրերը՝ հաշվի առնելով հնոցում ձևավորվող ազոտի օքսիդների վրա ունեցած ազդեցությունը [4, 5]:

Այրիչների տիպային հարմարադասման ընդհանրական բնութագրերը

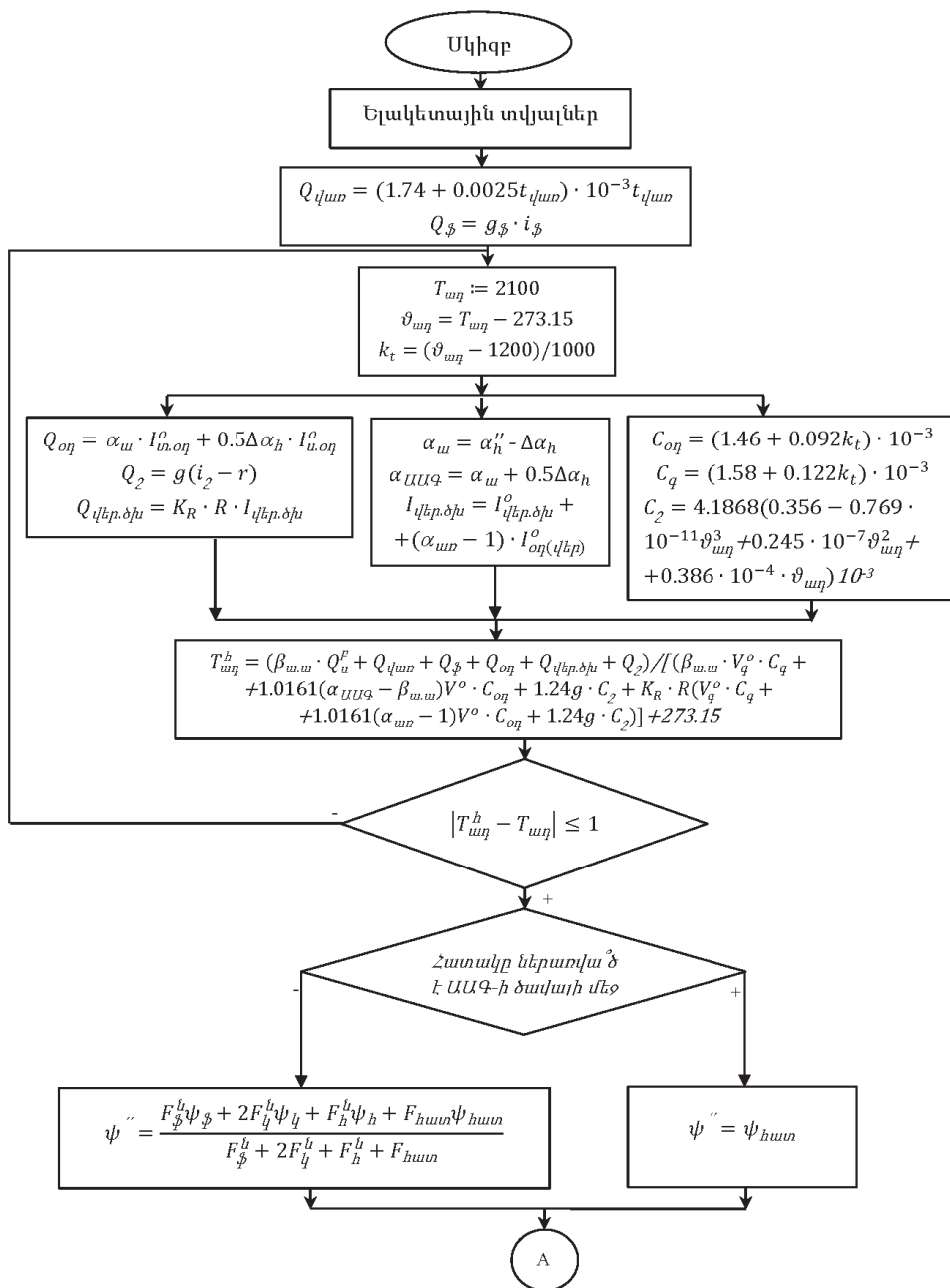
Հարմարադասման տիպը	Առավելությունները	Թերությունները
1	2	3
Ճակատային	- Հարմար է շահագործման և կառուցման, իսկ կարծր վառելիքի այրման դեպքում՝ նաև աղացների հարմարադասման տեսանկյունից, - վառելիքատարները ստացվում են կարճ, միևնույն երկարությամբ և միատեսակ, - այրիչները, վառելիքատարները, օդատարները և դրանց կառավարման համակարգերը վերանորոգման և սպասարկման տեսանկյունից ավելի հարմար են:	- Վառելիքի վերջնայրումը կատարվում է բարձրացող հոսքի նեղ շերտում՝ հետին պատին մոտ, - անխուսափելի է ջահի հպումը հնոցային խցի հետին պատին, - թույլ չի տալիս լավ օգտագործել հնոցային խցի ողջ ծավալը՝ ճակատային պատի մոտ գոյացող երկարաձգված մրրկային հոսքերի պատճառով, - հանգեցնում է հնոցի պարագծի էկրանային խողովակների անհավասարաչափ ջերմընկալմանը և խողովակների խարամապատման ինտենսիվության մեծացմանը, - բարձրացող հոսքի մեծ արագության հետևանքով կրճատվում է հնոցային ծավալում վառելիքի մնալու ժամանակը, ինչը մեծացնում է դրա թերայրման հավանականությունը:

Աղյուսակի շարունակություն

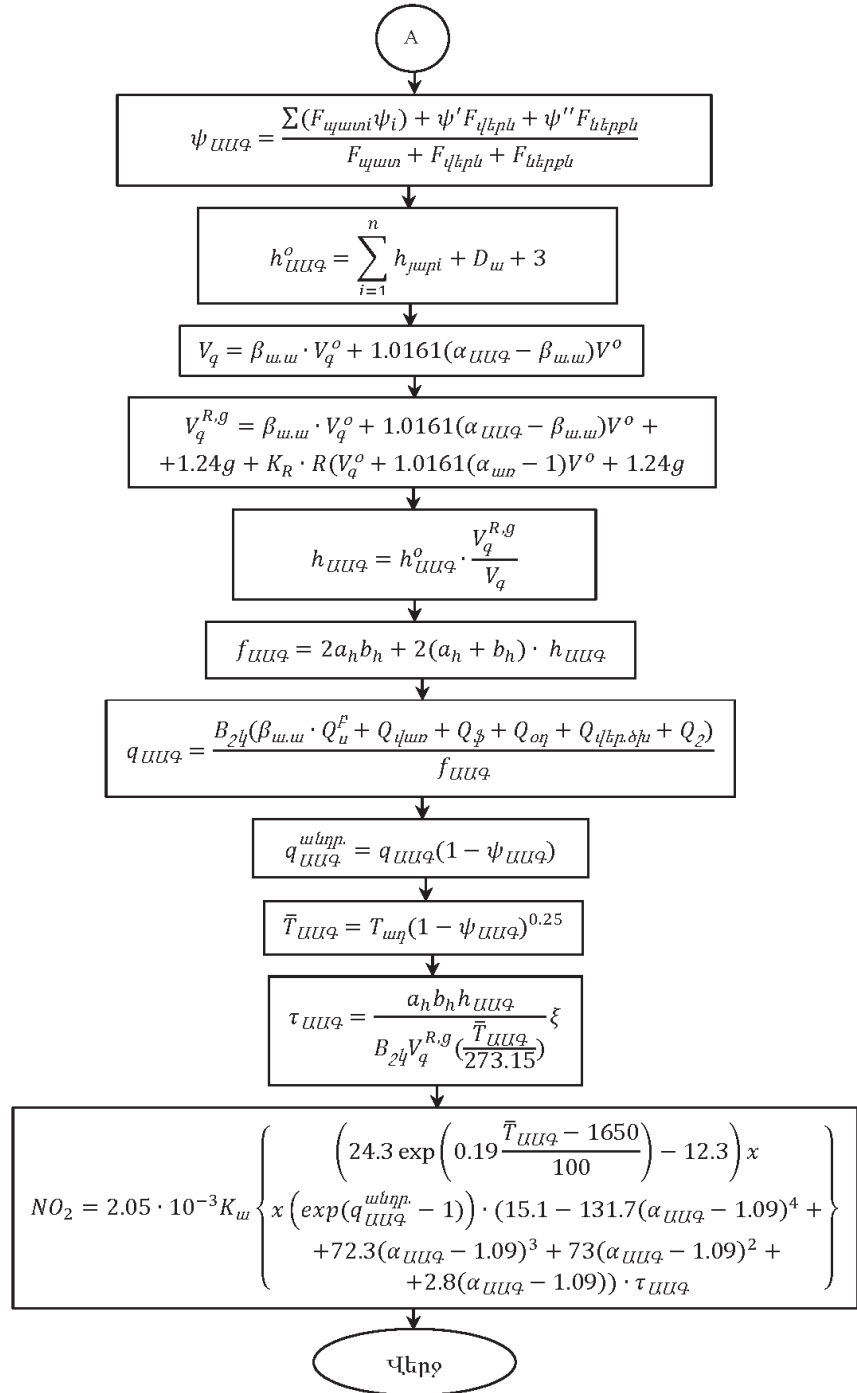
1	2	3
Հանդիպակաց	- Նպաստում է վառելիքի այրման գործընթացի արդյունավետության մեծացմանը, - թույլ է տալիս բացառել էկրանային խողովակների վրա ջահի անմիջական դինամիկ ազդեցության հնարավորությունը, - ըստ հնոցի լայնության՝ ջերմաստիճանային դաշտը ստացվում է հավասարաչափ, - հանդիպակաց ջահերի փոխհարվածման դեպքում հնոցային խցում ջերմազանգվածափոխանակությունը լավանում է, իսկ սա իր հերթին նպաստում է վառելիքի բոցավառման և այրման գործընթացի արդյունավետության բարձրացմանը, - այրման գործընթացն ավելի կայուն է և բավականին ինտենսիվ ընթանում է օդի ավելցուկի գործակցի փոքր արժեքների պայմաններում:	- Հնարավոր է ջահի հպումը հնոցի կողային պատերին, ինչն էլ կանխարգելելու համար կողային պատի և այրիչների միջև հեռավորությունը ընտրվում է միջայրիչային հեռավորությունից ավելի մեծ, - այրիչների մոտ ջահի հորիզոնական կտրվածքը հարևան այրիչների ջահերով էականորեն կտրված է հնոցային խցի էկրանային մակերևույթներից, ինչը բարդացնում է էկրանային խողովակների ջերմատվությունը և նպաստում է ազոտի օքսիդների էլքի մեծացմանը, - գործնականում դժվար է պահպանել հանդիպակաց այրիչային հոսքերի շարժման քանակների հավասարությունը, որի խախտման դեպքում այրման միջուկը կտեղաշարժվի դեպի հնոցի հետին կամ ճակատային պատը:
Հանդիպակաց – տեղաշարժված	- Այրիչների նվազագույն հեռահարության շնորհիվ էկրանային խողովակները պաշտպանված են հոսքի դինամիկ ազդեցությունից, - ինտենսիվանում է շիթերի միջև ջերմազանգվածափոխանակությունը, - հանդիպակաց հոսքերի փոխադարձ արգելակման հետևանքով հնոցում ծխագազերի վերամբարձ շարժման արագությունը նվազում է՝ նպաստելով հնոցում վառելիքի մնալու տևողության մեծացմանը, հնոցային խցի լավ լցվածությանը, - ապահովում է ազոտի թերմիկ օքսիդների փոքր էլքը:	- Նպատակահարմար է միայն ճեղքային այրիչների կիրառման դեպքում: - յարուսների քանակը սահմանափակ է:

1	2	3
Տանգենցիալ	- Այրիչների տանգենցիալ հարմարադասմամբ հնոցներն ունեն շրջապատող տարածությունից ծխագազերի մեծ էժեկցիա դեպի հիմնական հոսք և դրանից՝ ինտենսիվ ջերմատվություն, - հնոցային խցում ջերմային հոսքերի բավականին հավասարաչափ բաշխվածության հետևանքով ջահում ջերմաստիճանները կայունանում են ոչ շատ բարձր տիրույթում, որն էլ էականորեն նվազեցնում է ազոտի թերմիկ օքսիդների առաջացումը:	- Ցանկալի աերոդինամիկական պայմաններ ստանալու համար հնոցի կտրվածքը պետք է լինի քառակուսի կամ էլ քառակուսուն մոտ տեսքի, -այրիչները պետք է տեղաբաշխված լինեն կամ հնոցի անկյուններում, կամ էլ պարագծով:
Հատակային	- Հնոցային խցում առաջանում են օպտիմալ պայմաններ ջահի ակտիվ գոտու հովացման համար, - նվազեցնում են ջահում առավելագույն ջերմաստիճանները, - նվազագույնի է հասնում ազոտի թերմիկ օքսիդների ելքը:	- Կառուցվածքային բարդություն, - օդի կազմակերպված մատուցման և կարգավորման բարդություն:

Առաջնորդվելով կատարված ընդհանրական վերլուծության արդյունքներով և Հրագրանի ՊՇԷԿ-ի TFM-104 շոգեկաթսայի 12 ճակատային այրիչների՝ 10 հատակային այրիչներով (վերջիններիս արտադրողականությունը, ըստ վառելիքի, գերազանցում է սովորական գազամագույնային այրիչների հզորությանը, որոնք դրվում են հնոցի ուղղահայաց պատերին) փոխարինման արդյունքում ստացված շահագործման տվյալներով, նպատակ է դրվել մշակել այրիչների տարբեր հարմարադասման պարագայում այրման արգասիքներում պարունակվող ազոտի օքսիդների քանակության հաշվարկման ալգորիթ, որի հիման վրա կառուցված բլոկ-սխեման բերված է նկ. 1-ում: Մշակված բլոկ-սխեմայի և Excel ծրագրային փաթեթի կիրառմամբ կատարված հաշվարկների արդյունքները վկայում են այն մասին, որ այրիչների հարմարադասման փոփոխությունը, հաշվի առնելով դրանցից յուրաքանչյուրի դեպքում հնոցային տարածության լցվածության գործակիցները և այրման ակտիվ գոտում ծխագազերի մնալու ժամանակամիջոցը, հանգեցնում է այրման ակտիվ գոտում ջերմաստիճանային մակարդակի նվազեցման ($\Delta T_{\text{ուգ}} = T_{\text{ուգ}}^{\text{հ}} - T_{\text{ուգ}}^{\text{սխ}} \approx 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$) և, հետևաբար, նաև ազոտի թերմիկ օքսիդների ելքի նվազեցման [4]:



Նկ. 1. Այրման արգասիքներում պարունակվող ազոտի օքսիդների քանակության հաշվարկման բլոկ-սխեման



Նկ. 1-ի շարունակությունը

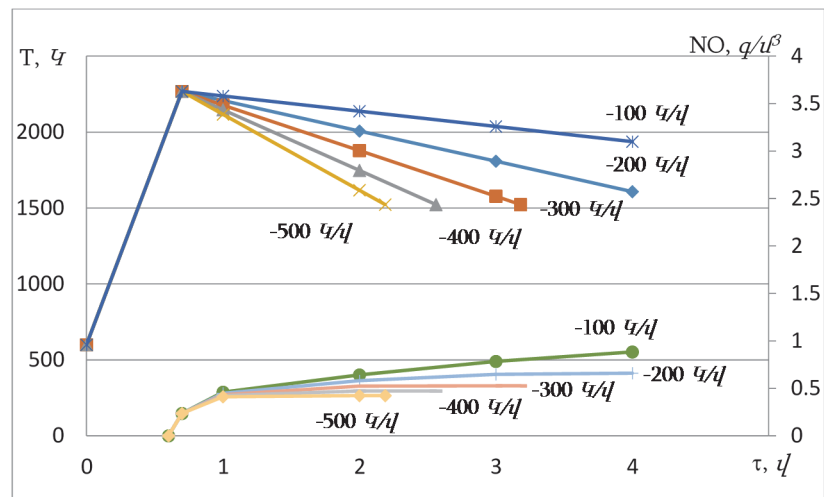
Ընդ որում, ծխագազերի վերաշրջանառության բացակայության դեպքում այրիչների հարմարադասման փոփոխությունը, հնոցային աերոդինամիկայի և ջերմազանգվածափոխանակության պայմանների բարելավման շնորհիվ, հանգեցնում է թերմիկ NO-ների մոտավորապես 20% նվազմանը: Ալգորիթմը հնարավորություն է ընձեռում հաշվի առնել նաև վերաշրջանառվող ծխագազերի քանակության, դրանց հնոց մատուցման ձևի, ինչպես նաև այրման գոտի խոնավության կամ շոգու մատուցման դեպքում ազոտի օքսիդների ելքի կրճատումը:

Գոյություն ունեցող տվյալների վերլուծությունը վկայում է այն մասին, որ ջերմային էլեկտրակայաններում հեղուկ և գազային վառելիքների այրման արդյունքում ձևավորվող ազոտի օքսիդների գերակշիռ մասը թերմիկ NO-երն են, որոնց առաջացումը տեղի է ունենում ջերմաստիճանային համեմատաբար փոքր տիրույթում՝ $T_{\text{UUG}}^{\text{max}}$ -ից մինչև $T_{\text{UUG}}^{\text{max}} - \Delta T_{\text{NO}}$: Գրված տարբերության վերջին բաղկացուցիչը կոչվում է Դ.Ա. Ֆրանկ-Գամենցկու <<ջերմաստիճանային աստիճան>> և որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ՝ $\Delta T_{\text{NO}} = R(T_{\text{UUG}}^{\text{max}})^2/E$, որում $T_{\text{UUG}}^{\text{max}}$ -ը այրման ակտիվ գոտու առավելագույն ջերմաստիճանն է, E , R -ը՝ ունիվերսալ գազային հաստատունը, իսկ E -ն՝ ազոտի օքսիդների առաջացման ռեակցիայի ակտիվացման էներգիան, որի թվային արժեքը հավասար է 560 կՋ/մոլ [6]:

Դեպի մթնոլորտ արտանետվող ազոտի օքսիդների քանակական փոփոխությունը հաշվարկելու համար, կախված այրման ակտիվ գոտու ջերմաստիճանից և ջահի հովացման արագությունից, կատարվել են որոշակի ընդունելություններ: Մասնավորապես, ջահի սկզբնական ջերմաստիճանը ընդունվել է $T_o = 600$ Կ, իսկ հնոցի վերջնամասում ծխագազերի ջերմաստիճանը՝ $T_{\text{U}} = 1523$ Կ (որպես գազամագույրային կաթսաների հնոցի ելքում ծխագազերի բնութագրիչ ջերմաստիճան), ջահի հովացման արագությունը՝ $\varphi_{\text{hny}} = (T_{\text{U}} - T_{\text{UUG}}^{\text{max}})/\tau_{\text{hny}}$, որտեղ τ_{hny} -ը $T_{\text{UUG}}^{\text{max}}$ -ից մինչև T_{U} ջերմաստիճանային միջակայքում ծխագազերի մնալու ժամանակն է, գնահատվել է $\varphi_{\text{hny}} = -(100 \dots 500)$ Կ/վ տիրույթում: Հաշվի առնելով վերոնշյալ ալգորիթմի իրականացման արդյունքում ստացված և հատակային այրիչներով կահավորված TTM-104 շոգեկաթսայի շահագործման արդյունքում Հրագդանի ՊՇԷԿ-ում առկա տվյալները՝ նպատակային է համարվել այրման ակտիվ գոտում առավելագույն ջերմաստիճանը վերցնել հենց հատակային այրիչների տեղակայման դեպքում ստացված հաշվարկային ջերմաստիճանը՝ 2267,3 Կ:

Նկ. 2-ում բերված գրաֆիկական առնչությունը պատկերում է ջահի հովացման տեմպի ազդեցությունը ազոտի թերմիկ օքսիդների ելքի վրա: Ստացված գրաֆիկական առնչությունից կարելի է եզրակացնել, որ ջահի հովացման արագության մեծացմանը զուգընթաց յուրաքանչյուր հաջորդ վայրկյանում, պայմանավորված հնոցային խցում ջերմաստիճանի մակարդակի նվազմամբ, առաջա-

ցող ազոտի թերմիկ օքսիդների քանակությունը նվազում է, ընդ որում, որոշակի ջերմաստիճանից սկսած (կատարված հաշվարկների արդյունքները վկայում են այն մասին, որ նշված ջերմաստիճանը կազմում է մոտավորապես 1800 Գ) առաջացող թերմիկ օքսիդների քանակությունը գրեթե աննշան է լինում:



Նկ. 2. Ջահի հովացման տեմպի ազդեցությունը ազոտի թերմիկ օքսիդների ելքի վրա

Առաջնորդվելով նույն դատողություններով՝ նմանօրինակ գրաֆիկական առնչություններ կարելի է ստանալ նաև այրիչների ճակատային հարմարադասման դեպքում, սակայն այս դեպքում այրման ակտիվ գոտու առավելագույն ջերմաստիճանը և առաջացող թերմիկ օքսիդների քանակությունը կլինեն ավելին: Կատարված հաշվարկների արդյունքները վկայում են այն մասին, որ այրիչների ճակատային հարմարադասման դեպքում $T_{\text{max}}^{\text{max}}$ -ն մոտ 130 Գ-ով գերազանցում է այրիչների հատակային հարմարադասման դեպքում նույն ջերմաստիճանը, իսկ ԱԱԳ-ում առաջացող թերմիկ օքսիդների քանակությունն աճում է մոտ 40%-ով:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Մարուխյան Ռ.Ջ., Էլբակյան Ս.Հ. Ազոտի օքսիդների նվազեցման միջոցառումների համադրական վերլուծություն // ՀՊՀՀ (Պոլիտեխնիկ) տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.- Երևան, 2011.- Հատոր 2. էջ 392-397:
2. Էլբակյան Ս.Հ. Օդի ավելցուկի գործակցի նվազեցման ժամանակ ՋԷԿ-երի գազային արտանետումների վտանգավորության աստիճանի գնահատման ալգորիթմի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՀՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա.-2013.-Հատ. 66, N2.-էջ 133-138:
3. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. Раздел: подготовка и сжигание топлива: Учеб.-метод комплекс (Учеб. пособие). - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 119 с.

4. **Росляков П.В.** Методы защиты окружающей среды: Учебник для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007.-336 с.
5. **Хзмалян Д.М.** Теория топочных процессов: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1990.-352 с.
6. **Росляков П.В., Зинкина Н.В.** Влияние условий теплообмена в топочных камерах на образование термических оксидов азота // Теплоэнергетика – 1991.- N12. - С. 60-62.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.06.2017:

С.Г. ЭЛБАКЯН

ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ ГОРЕЛОК НА ВЫХОД ТЕРМИЧЕСКИХ ОКСИДОВ АЗОТА

Типичная компоновка горелок оказывает существенное влияние на выход оксидов азота, что обусловлено теплоотдачей в камере сгорания, наполнением продуктов сгорания в топочной камере и изменениями условий тепломассообмена. С целью оценки количества оксидов азота, содержащихся в продуктах сгорания, для различных случаев компоновки горелок разработаны расчётный алгоритм и соответствующая блок-схема. Оценено также влияние скорости охлаждения факела на выход термических оксидов азота.

Ключевые слова: термические оксиды азота, фронтальная компоновка горелок, подовая компоновка горелок, зона активного сгорания, скорость охлаждения факела.

S.H. ELBAKYAN

THE INFLUENCE OF THE BURNER ARRANGEMENT ON THE EXIT OF THERMAL OXIDES OF NITROGEN

The typical arrangement of burners has a significant influence on the formation of thermal oxides of nitrogen caused by changes in the heat and mass exchange conditions in the furnace and by changes in the furnace fullness with exhaust gases. Aimed at evaluating the amount of nitrogen oxides in exhaust gases at different arrangements of burners, an evaluation algorithm and an adequate diagram are developed. The influence of the cooling effect of the torch on nitrogen oxide formation is also estimated.

Keywords: nitrogen thermal oxides, frontal arrangement of burners, on-floor arrangement of burners, active combustion zone, the torch cooling speed.

Г.С. ВАРДАНЯН

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УСИЛИТЕЛИ С УЛЬТРАНИЗКИМ УРОВНЕМ
ШУМА ДЛЯ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Дается описание быстродействующих усилителей для положительных и отрицательных наносекундных импульсов с низким уровнем искажений и ультранизким уровнем шумов, предназначенных для усиления сигналов с анодных и катодных плоскостей многопроволочных пропорциональных камер низкого давления. Усилители построены по двухкаскадной схеме на основе быстродействующих и малошумящих интегральных операционных усилителей. Разработанные усилители используют однополярное питание, имеют высокое усиление, стабильны в работе. Выходная нагрузка усилителей - 50 Ом , и для их изготовления применяются коммерчески доступные компоненты.

Ключевые слова: многопроволочные детекторы, малошумящие усилители, пропорциональные камеры низкого давления.

Многопроволочные пропорциональные камеры низкого давления (МПКНД) нашли широкое применение в экспериментальной физике. Способность многопроволочных пропорциональных камер, работающих при низком давлении газового наполнения, регистрировать сильно ионизирующие частицы с хорошим пространственным и временным разрешением значительно расширяет область применения этих детекторов [1,2].

Известно, что амплитуда импульса выходного напряжения в детекторах пропорциональна энергии, потерянной частицей вследствие взаимодействия с веществом детектора. В пропорциональных камерах низкого давления в результате уменьшения количества вещества, ионизируемого частицами, происходит ослабление величин регистрируемых сигналов, и амплитуды этих сигналов составляют от единиц до сотни микровольт.

Такая величина недостаточна для регистрирующих и анализирующих устройств. Поэтому использование полезной информации с таких детекторов в электронной логике эксперимента возможно только после определенного усиления, где усилитель представляет собой интерфейс между детектором и остальной частью системы обработки импульсов. В зависимости от параметров детектора и энергии излучателя сигналы усиливаются приблизительно в $10^2 \dots 10^4$ раз [3-5].

Основной функцией таких усилителей является извлечение и усиление сигнала от детектора без значительного ухудшения внутреннего отношения сигнал - шум. При разработке усилителя необходимо прийти к компромиссу: выбрать усилители с широкой полосой, ориентированные, главным образом, на получение крутых фронтов импульсов или на необходимую величину усиления, шума и стабильности. Чтобы минимизировать шум при необходимом усилении, требуется схема из двух каскадов, и очевидно, что первый каскад (предусилитель) в этом случае должен иметь ультранизкий уровень шума, так как, усиливая входной сигнал, он в наибольшей степени влияет на шумовые характеристики всего усилителя, поэтому в первом каскаде необходимо использовать операционный усилитель (ОУ) - ультрабыстрый и с ультранизкими шумами. А для обеспечения необходимого усиления сигнала второй каскад усилителя необходимо выбрать возможно с высокой скоростью нарастания импульса [6].

Так как фронт импульса от МПКНД соответствует $\tau \sim 5 \dots 7$ нс при длительности сигнала порядка 25 нс, то в первом каскаде обеспечение ультранизкого шума и широкого спектра стало возможно при использовании ОУ типа ОРА847 производства "Texas Instruments" с ультранизким уровнем шумов ($0,85 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) и очень широкой полосой пропускания ($3,9 \text{ ГГц}$). Фирма гарантирует стабильную работу ОУ ОРА847 при усилении $K \geq 12$ [7].

Чтобы получить необходимое усиление, для второго каскада удобно использовать, как сказано выше, высокоскоростной ОУ типа AD8009, скорость нарастания импульса которого достигает 5500 В/мкс с входным напряжением шума, равным $1,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ [8].

Обычно ОУ требуют двухполярного питания, поэтому первоначальная схема, собранная с двумя источниками питания для проверки полосы пропускания синусоидального сигнала, показана на рис. 1.

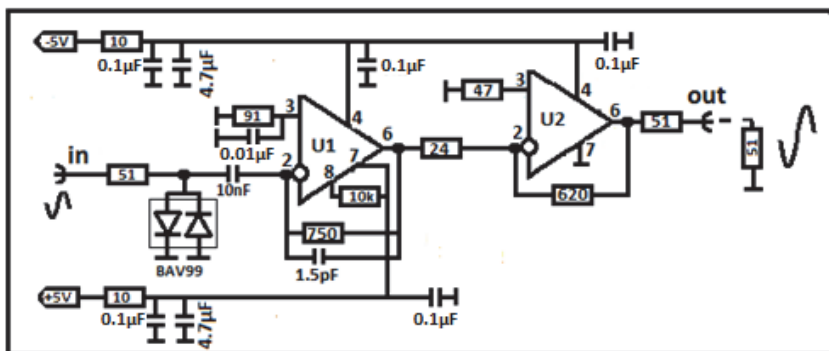


Рис.1. Усилитель синусоидальных сигналов с питанием $\pm 5\text{В}$

на ОУ, обычно лежащий в середине диапазона питающего напряжения, с помощью резистивных делителей R3, R4 и R7, R8.

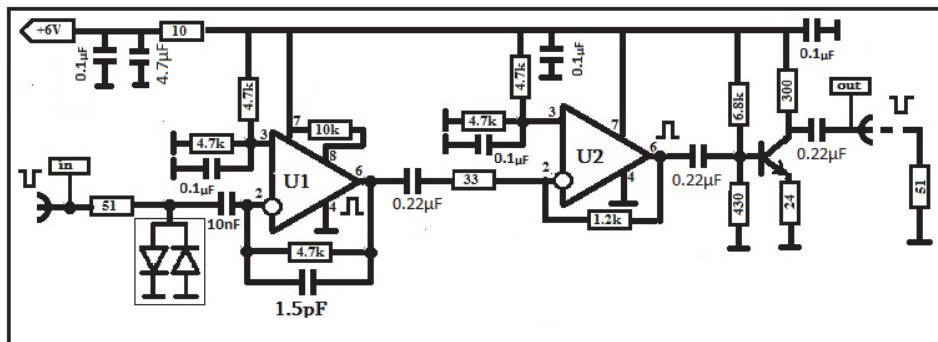


Рис.4. Схема усилителя для сигналов с катодной плоскости

Как можно заметить, первые каскады обоих усилителей для сигналов с катодной и анодной плоскостей выполнены одинаково в виде инвертирующих усилителей с коэффициентом усиления ~ 40 . Для сигналов с катодной плоскости второй каскад собран в виде инвертирующего каскада, а для сигналов с анодной плоскости - собран в виде неинвертирующего усилителя. Коэффициент усиления для вторых каскадов $\sim 30 \dots 50$.

VD1 представляет собой диодную сборку, которая защищает вход от отрицательных или положительных выбросов высокого напряжения (рис.3,4).

Выходные каскады обеих схем разработаны как усилители-инверторы на одном транзисторе, работающие в режиме отсечки.

Резисторы в цепи базы подобраны так, что отсекаются сигналы меньше 7 мВ на базе транзистора, которые представляют собой напряжение шумов усилителя на выходе второго каскада. Амплитуда значения выходного шума всего усилителя получается $\sim 80 \text{ мкВ}$ (рис.5).

Усиленные сигналы с плоскостей пропорциональных камер низкого давления от анодных и катодных проволочек при облучении их радиоактивным источником показаны на рис.6.

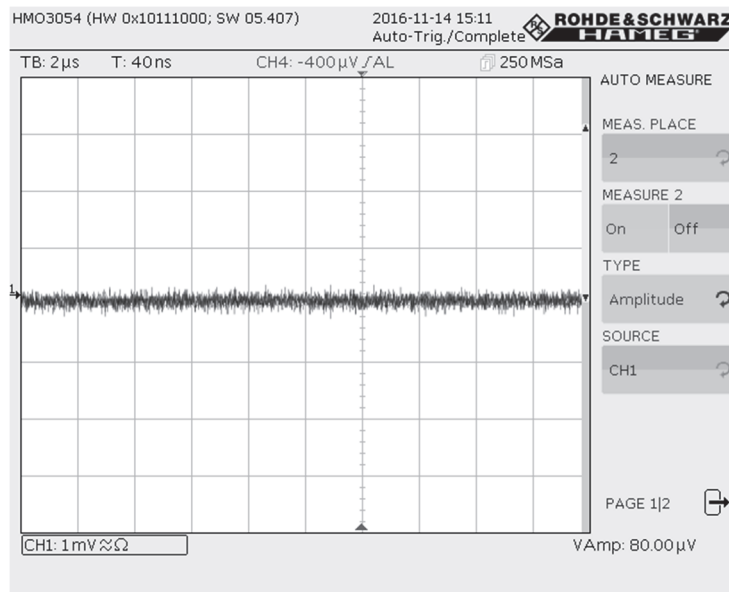


Рис.5. Сигнал шума на выходе усилителя без входного сигнала

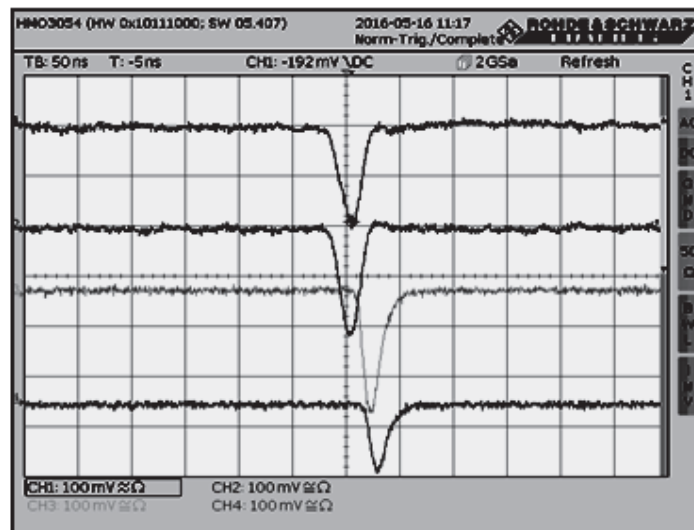


Рис.6. Осциллограммы импульсов с выходов усилителей

Схемы усилителей собраны поверхностным монтажом, что позволяет производить плотную компоновку. В этой конструкции ОУ имеют корпус SOIC -8, все резисторы и конденсаторы размера SMD 06×03 и размещены на одной стороне платы. Обратная сторона печатной платы полностью соединена с нулевым потенциалом питания (рис.7).

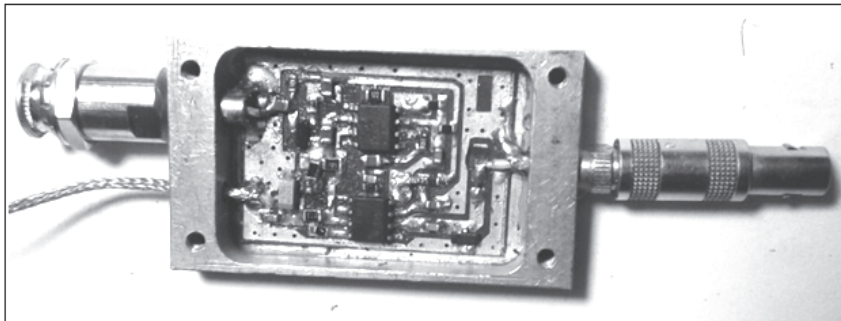


Рис. 7. Усилители собраны в алюминиевой коробке размерами 40х24х5 мм³.
Входы и выходы усилителей осуществляются LEMO разъемами

С помощью облучения альфа источником пропорциональных камер были получены различные спектры (рис.8).

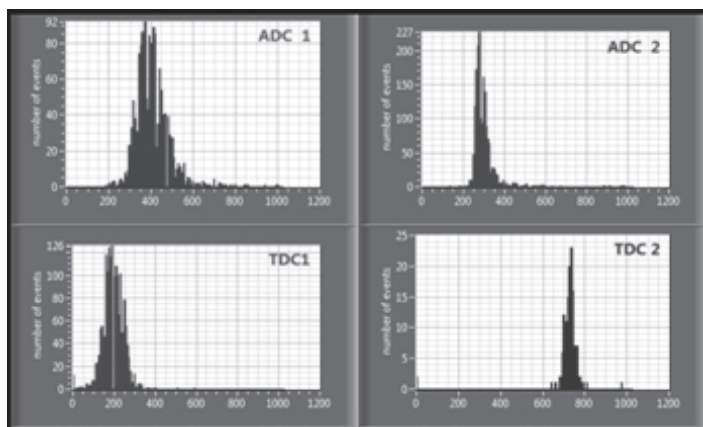


Рис.8. Временные и амплитудные спектры, полученные с плоскостей МПКНД с помощью TDC Lc2228 и ADC Lc2249A с использованием усилителей

СПЕЦИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

Питание: V	+6
Время нарастания: $нс$	2.5 ($G=100V/V$) 7($G=2000V/V$)
Среднеквадратичное значение . выходного шума: (RMS) $мкВ$	≤ 100 (85)
Усиление: $мВ/мкА$	100...200
Интегральная нелинейность: %	≤ 1.5
Входной импеданс: Ω	50
Нагрузка: Ω	50

Задержка сигнала :	$nc \leq 5$
Потребляемая мощность: <i>мВт</i>	~ 230
Размер металлической коробки	$22 \times 40 \times 5 \text{ мм}^3$

Описанные выше усилители могут быть использованы в любой системе, где требуется высокая скорость усиления сигналов низкого уровня с малым шумом.

Автор выражает благодарность А.Т. Маргаряну и Н.К. Григоряну за помощь в работе.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке ГКН РА в рамках научного тематического плана 10-27/14СҮС-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low pressure MWPC system for the detection of alpha - particles and fission fragment / **A.T. Margaryan, J.-O. Adler, H.S. Vardanyan, S.V. Zhamkochyan, et al** // Armenian Jurnal of physics.- 2010.- V.3, issue 4.- P. 282-291.
2. Многопроволочная пропорциональная камера низкого давления с высоким коэффициентом газового усиления / **Д.А. Абдушукуров, Ю.В. Заневский, С.А. Мовчан и др.** Препринт ОИЯИ.- Дубна, 1982.- P. 13 82-812.
3. <http://www.ortec-online.com/download/Preamplifier-Introduction.pdf>
4. Однополярное питание операционных усилителей
www.platan.ru/shem/pdf/str10-14n.pdf
5. Усилители-формирователи сигналов для многопроволочных детекторов Протвино / **Ю.Б. Бушнин, А.К. Коноплянников.**- ИФВЭ, 1992. - 4 с.: ил.- (Препр). Ин-т физики высок. энергий ИФВЭОЭА 92-105.
6. **Eli. Flaxer** A low-cost, ultra-fast and low-noise preamplifier for micro channel plates Meas. Sci. Technol. (2006) **17** p.37–40.
7. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa847.pdf>
8. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8009.pdf
9. Design and Development of a Charge-Sensitive Preamplifier for Nuclear Pulse / **M. Nazrul Islam, T. Fujiwara, et al** // Processing International Journal of scientific research and management (IJSRM).- 2013.- V.1, issue 6.- P. 303-307.
10. **Чарльз Китчин.** Особенности применения операционных усилителей при однополярном питании. Компания Analog Devices .
http://electroff.narod.ru/docs/files4/andev_229.pdf

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна (ЕрФИ). Материал поступил в редакцию 15.03.2017.

Հ.Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԱՂՄՈՒԿԻ ԳԵՐՑԱԾԻ ՄԱԿԱՐԴԱԿՈՎ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ ՀԱՄԱՄԱՆ ՈՒԺԵՂԱԳՈՐԾ ՑԱԾԻ ԸՆՇՄԱՆ ԲԱԶՄԱԼԱՐ ԽՑԻՎՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Առաջարկվում են գերցածր աղմուկներով դրական և բացասական նանովայրկենային մուտքային իմպուլսներով արագագործ ուժեղացուցիչներ, որոնք օգտագործվում են բազմալար ցածր ճնշման համամասն խցիկների (ԲՑՀՀԽ) անոդային և կատոդային հարթություններից ազդանշաններն ուժեղացնելու համար: Ուժեղացուցիչները նախագծված և կառուցված են երկփուլ սխեմայի հիման վրա՝ կիրառելով արագագործ և գերցածր աղմուկներ ունեցող օպերացիոն ուժեղացուցիչներ: Սարքը սնուցման համար օգտագործում է միափնեռ սնման աղբյուր, ունի բարձր ուժեղացում և կայուն է աշխատանքում: Ուժեղացուցիչի ելքային բեռնվածությունը – $50 \text{ } \Omega$ է:

Առանցքային բառեր. բազմալար դետեկտորներ, ցածրաղմուկ ուժեղացուցիչներ, ցածր ճնշման համամասն խցիկ:

H.S. VARDANYAN

FAST, LOW-NOISE AMPLIFIERS FOR LOW-PRESSURE MULTI-WIRE PROPORTIONAL CHAMBERS

Fast, low distortion and ultra low- noise amplifiers for positive and negative nanosecond pulses that are employed to amplify signals from the anode and cathode planes of low- pressure multi-wire proportional chambers. Amplifiers are built on a two-stage scheme based on the ultrafast and low-noise integrated operational amplifiers. The developed amplifiers use single supply, have high gain and stability. The amplifiers have a $50 \text{ } \Omega$ load. Commercially available components are used for their construction.

Keywords: Multiwire detectors, low-noise preamplifiers, proportional chambers of low pressure.

А.Г. ГУЛЯН, О.Ж. СЕВОЯН, А.М. ТАНТУШЯН

**ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В
АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ МОДУЛЯЦИЙ**

Целью автоматического распознавания модуляций (АРМ) является опознание типа модуляции принятого сигнала без каких-либо начальных данных о нем. АРМ представляет собой ответственную задачу, поскольку для демодулятора чрезвычайно важно знать правильный тип модуляции принятого сигнала. Для решения этой задачи существует несколько методов и технологий, одними из которых являются искусственные нейронные сети (ИНС). В данной работе описаны ИНС с целью дальнейшей разработки алгоритма для решения задачи АРМ.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, автоматическое распознавание модуляций, метод распознавания образов, обратное распространение ошибки.

Введение. Телекоммуникационные системы и радиотехнические устройства имеют особую и важную роль в развитии новейших технологий. В XXI веке сферы радиотехники и телекоммуникации занимают одно из наиболее важных и быстро развивающихся направлений, поскольку они являются ключевыми аспектами огромного количества гражданских и военных приложений. Новейшие технологии дают возможность разработать новые и усовершенствовать имеющиеся схемы для модуляций, что позволяет осуществить более помехоустойчивую связь и достичь значительно больших скоростей передачи данных. Чтобы не исказить информационный сигнал, нужно применить по отношению к принятому сигналу правильный демодулятор. Возникает вопрос: как это сделать без каких-либо начальных данных о сигнале?

Для решения этого вопроса используется автоматическое распознавание модуляций, которое осуществляется с помощью различных методов и алгоритмов. Классификаторы модуляций особенно важны для таких приложений, как мониторинг спектра, распознавание межканальной интерференции, электронная война, обнаружение “опасности” и т.д.

В основном существует два способа для АРМ: метод теоретического решения и метод распознавания образа (МРО). Метод теоретического решения классифицирует тип модуляции на основе теории вероятности и считается неэффективным для этой задачи, поскольку результаты не имеют необходимой точности [1], а МРО, наоборот, лежит в основе многочисленных удачно разработанных алгоритмов и имеет большой интерес в различных сферах.

Огромный вклад в решение задачи АРМ внесли Е.Е. Аззоуз и А.К. Нанди, приведя алгоритмы для АРМ аналоговых и цифровых сигналов [1]. Также они разработали алгоритмы для МРО, используя искусственные нейронные сети. На данный момент ИНС являются одним из наиболее общепринятых и продуктивных методов для МРО, так как они имеют большую точность в классификации типа модуляций. Однако задача АРМ находится на стадии исследования, поскольку технологии развиваются, виды модуляций прогрессируют, при этом, с одной стороны, параллельно возникают новые препятствия, с другой - разрабатываются новые и совершенствуются имеющиеся методы для решения этой задачи.

С целью использования ИНС в дальнейших разработках алгоритма и реализации метода для решения задачи АРМ в работе подробно описаны такие сети и их принцип работы, дано общее описание алгоритма обратного распространения ошибки и сделаны выводы по применению ИНС для АРМ.

1. Описание и принцип работы ИНС. Самые ранние исследования в области ИНС были проведены в 1943 г. американским нейропсихологом У. Мак-Каллаком и математиком У. Питтсом. В [2] они пытались объяснить функцию нейрона, построив простую искусственную нейронную сеть с помощью электрических цепей. В наши дни ИНС имеют большую популярность, продолжают развиваться и применяются в приложениях различных сфер, таких как медицинская диагностика, обработка сигналов, предсказание курса валюты, МРО и т.д.

Нейрон является главной составной клеткой нервной системы. Как показано на рис. 1, он состоит из тела, аксона и дендритов. Аксон – это длинный отросток, через который нервные импульсы идут от тела нейрона к другим клеткам. Нейроны соединяются между собой через синапсы, а дендриты ответственны за регулирование этой связи [3].

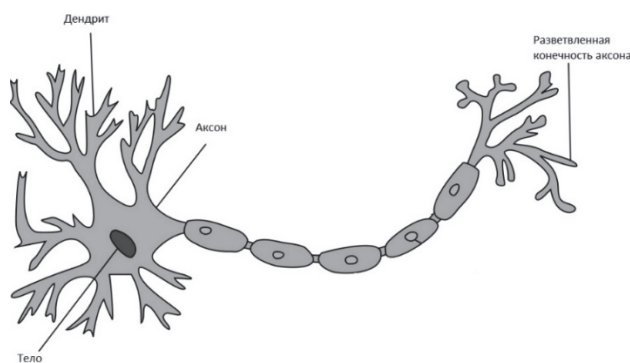


Рис. 1. Конструкция нейрона

Соединяясь между собой, нейроны образуют сеть. Главным примером такой сети может служить нервная система человеческого мозга. Работой нейронной сети головного мозга обусловлены наше общее восприятие вещей, мыслительность, распознавание образов и вообще нормальное функционирование. Функциональность ИНС основана на том же принципе. В общем их функция состоит в том, чтобы при конкретном входном сигнале на выходе дать соответствующее выходное значение.

После исследований У. Мак-Каллака и У. Питтса Д. Хебб в 1949 г. в [4] описал главные принципы обучения нейронов, а несколько лет спустя американский нейрофизиолог Ф. Розенблат разработал устройство, которое моделировало восприятие головного мозга [5]. Он назвал это устройство перцептроном. Перцептрон – это математическая модель нейрона, которая состоит из нескольких входов, скрытого слоя и одного выхода. Однослойным называют перцептрон, у которого один скрытый слой. Каждый из слоев состоит из “нейронов”, каждый из которых соединен с каждым нейроном следующего слоя. Соединяющие линии имеют свой индивидуальный вес “ w ”, который представляет собой число, умножаемое на значение данных, протекающих через эту линию. На входе любого нейрона скрытого слоя все данные, полученные через каждую линию, суммируются. В случае, когда эта сумма больше какого-то ранее заданного порога, на выход подается “1”, а если меньше, то “0”. Эти выходные значения описывают активное или пассивное состояние нейрона. Однослойный перцептрон непродуктивен для комплексных задач, требующих сложных расчетов, например, классификации данных или распознавания человеческого лица. Для таких задач используются многослойные нейронные сети, состоящие из нескольких входов, более чем одного скрытого слоя и нескольких выходов. На рис. 2 изображена схема ИНС с двумя скрытыми слоями.

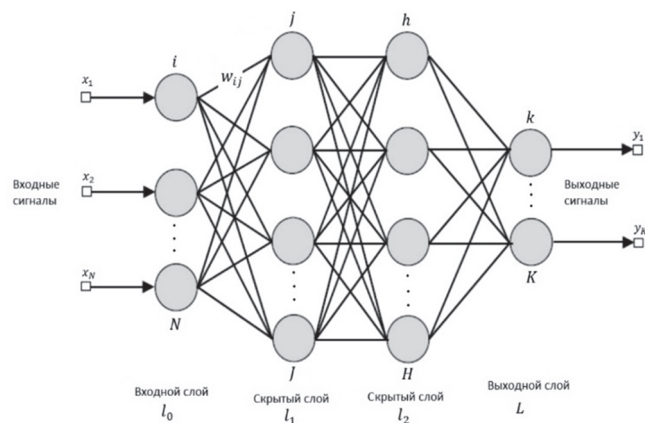


Рис. 2. Многослойная нейронная сеть

Здесь $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J, h = 1, 2, \dots, H, k = 1, 2, \dots, K$ – соответственно номера нейронов в соответствующих слоях, а номер слоя - $l = 0, 1, \dots, L$. Нейроны любого слоя, кроме выходного, соединены с нейронами следующего слоя линиями с весами, которые для входного и последующего слоев назначены как w_{ij} . В ИНС также существует понятие “нейрон смещения”, которое представляет собой дополнительный узел нейрона для каждого слоя, кроме входного. Нейрон смещения соединен весовой линией со всеми нейронами данного слоя и всегда имеет выходное значение “1”. В случае, когда на вход нейрона какого-то слоя, кроме входного, подается “0”, сеть не сможет обучиться. Для устранения этой проблемы используются нейроны смещения. Таким образом, выходами нейронов входного слоя являются те же сигналы x_i , что были даны на их вход, а входы нейронов последующего слоя описываются следующей формулой:

$$Net_j^{l_1} = \sum_{i=1}^N x_i w_{ij} + \theta_j,$$

где i - номер входа; j - номер нейрона в слое; l - номер слоя; θ_j - произведение выхода нейрона смещения и веса линии: $\theta_j = 1 \times w_{bj}^l, l = 1, 2, \dots, L$.

После эта сумма подается в активационную функцию $f(x)$ данного нейрона, в виде которой более часто используется сигмоидальная функция

$$\text{сигмоид} = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}},$$

где $x = Net_j^{l_1}$.

Отсюда следует, что выходы этих нейронов выражаются уравнением

$$O_j^{l_1} = f\left(\sum_{i=1}^N x_i w_{ij} + \theta_j\right).$$

При переходе к следующему слою веса умножаются на значения $O_j^{l_1}$. Следовательно, входные и выходные значения нейронов слоя l_2 соответственно равны

$$Net_h^{l_2} = \sum_{j=1}^J O_j^{l_1} w_{jh} + \theta_h, \quad O_h^{l_2} = f\left(\sum_{j=1}^J O_j^{l_1} w_{jh} + \theta_h\right).$$

Соответственно для выходного слоя имеем

$$Net_k^L = \sum_{h=1}^H o_h^{l_2} w_{hk} + \theta_k, \quad o_k^L = f\left(\sum_{h=1}^H o_h^{l_2} w_{hk} + \theta_k\right).$$

Без предварительного обучения система выдает выходные данные, отличные от требуемых, поскольку веса соединяющих линий для тренировки выбираются случайным образом. Смысл тренировки нейронных сетей заключается в конфигурации веса таким образом, чтобы выходные значения были бы максимально близки к требуемым. Для этого используется техника обучения с обратным распространением ошибки.

2. Обратное распространение ошибки. Для того чтобы обучить ИНС, подается набор обучающих данных (x_z, t_z) , $z = 1, 2, \dots, P$, где t_z - требуемые выходные значения сети для входных x_z , а P - общее число обучающих пар. В течение обучения ИНС система считает разность между полученными и требуемыми выходными данными для всех пар, которая называется функцией ошибки и выражается уравнением

$$E_z = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (y_k - t_{zk})^2.$$

Здесь t_{zk} - z -й элемент t_z , а y_k - k -е полученное выходное значение.

Общая функция ошибки системы будет

$$E = \sum_z E_z = \frac{1}{2} \sum_z \sum_k (t_{zk} - y_k)^2.$$

В начале обучения весам w задаются произвольные маленькие значения, а в процессе обучения вес обновляется в отрицательную сторону градиента до тех пор, пока E не станет минимальным, т.е. каждый вес обновляется так, что

$$w_{ij} = w_{ij} - \Delta w_{ij},$$

где

$$\Delta w_{ij} = \eta \frac{\partial E_z}{\partial w_{ij}}. \quad (1)$$

Здесь η - коэффициент скорости обучения.

Для выходного слоя производную E_z по w_{hk} можно рассчитать простым дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial E_z}{\partial w_{hk}} = \frac{\partial E_z}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial Net_k^L} \frac{\partial Net_k^L}{\partial w_{hk}},$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial O_k} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial O_k} (t_{zk} - O_k)^2 = O_k - t_{zk}, \\ \frac{\partial O_k}{\partial Net_k^L} &= \frac{\partial}{\partial Net_k^L} f(Net_k^L) = O_k(1 - O_k), \\ \frac{\partial Net_k^L}{\partial w_{hk}} &= \frac{\partial}{\partial w_{hk}} \left(\sum_{h=1}^H O_h^{l_2} w_{hk} + \theta_k \right) = O_h. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем

$$\frac{\partial E_z}{\partial w_{hk}} = (O_k - t_{zk}) O_k (1 - O_k) O_h.$$

Обозначим $\delta_k = (O_k - t_{zk}) O_k (1 - O_k)$, а для остальных слоев:

- $\delta_h = O_h(1 - O_h) \sum_{k=1}^K w_{hk} \delta_k$;
- $\delta_j = O_j(1 - O_j) \sum_{h=1}^H w_{jh} \delta_h$;
- $\delta_i = O_i(1 - O_i) \sum_{j=1}^J w_{ij} \delta_j$.

Из (1) следует, что

- $\Delta w_{hk} = \eta \delta_k O_h$;
- $\Delta w_{jh} = \eta \delta_h O_j$;
- $\Delta w_{ij} = \eta \delta_j O_i$.

3. Применение ИНС для АРМ. Классификаторы типа модуляций, которые используют МРО и ИНС, состоят из трех составных блоков: блока преобразования, блока классификатора и блока демодулятора. Вначале в блоке преобразования из принятого сигнала извлекаются особые характеристики, выбираемые в соответствии с видами модуляций, которые нужно распознать. Самым важным является блок классификатора, поскольку он отвечает за правильное распознавание вида модуляций.

При применении ИНС для АРМ на каждый вход сети подается одна вычисленная основная характеристика сигнала, при этом каждый из выходов соответствует одному типу модуляции. Некоторые особые характеристики сигнала могут быть одинаковыми для разных видов модуляции, но не существует таких два типа модуляций, чтобы все особые характеристики были одинаковыми. Нужно также иметь в виду, что увеличение набора рассматриваемых особых характеристик усложняет расчеты и увеличивает время учебы.

Для многослойных ИНС количество скрытых слоев и нейронов зависит от уровня сложности задачи, которую нужно решить. Их число должно соответствовать сложности задачи, поскольку при их недостатке классификация может быть не выполнена, а при превышающем количестве потребуется больше времени для обучения.

ИНС считаются самым продуктивным методом для МРО, так как имеют большие преимущества над остальными. Поскольку значения особых характеристик, извлеченных из сигнала, подаются на вход сети параллельно, а не последовательно, то их последовательность не имеет влияния на вероятность правильного ответа. Параллельно распределенная схема их обработки обеспечивает удобство и способность перенастраиваться для обработки цифровых сигналов. Наряду с этим ИНС не нуждаются в программировании для обучения. Они обучаются самостоятельно и адаптируются к сложным расчетам. Исследования этих сетей продолжаются по сей день, и они нашли применение в таких различных сферах, как медицина, финансы, энергетическая промышленность и т.д. Довольно обнадеживающим фактом является также то, что множество симуляций и разработанные алгоритмы в [6 - 8] показывают, что ИНС имеют почти идеальную точность для АРМ.

Закключение. АРМ является серьезной задачей в радиотехнике и требует большой точности в расчетах. Для точного распознавания вида модуляции в реальном времени необходимы правильно выбранный метод и тщательно разработанный алгоритм. Последний должен постоянно обновляться, совершенствоваться, поскольку с развитием технологий разрабатываются новые и более комплексные схемы модуляций, что влечет за собой новые проблемы для их распознавания. Многочисленные преимущества и большая точность результатов существующих алгоритмов для ИНС позволяют сделать заключение, что на данном этапе развития технологий ИНС являются одной из самых эффективных, удобных и развивающихся технологий для АРМ. Учитывая вышеприведенные преимущества, с целью разработки и реализации метода для АРМ всех видов модуляций при разных значениях отношения сигнал-шум предлагается использовать технику ИНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Azzouz E.E., Nandi A.K.** Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. - Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 214 p.
2. **McCulloch W.S., Pitts W.** A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of mathematical biophysics. - Chicago, 1943. – Vol. 5. – P. 115-133.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Нейрон](https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейрон)

4. **Hebb D.O.** The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. - New York: John Wiley And Sons, Inc., 1949. - 335 p.
5. **Rosenblatt F.** Principles of neurodynamics // Perceptions and the theory of brain mechanism. - Washington, DC: Spartan Books, 1961. - 260 p.
6. Automatic digital modulation recognition using artificial neural networks / **Z. Yaqin, R. Guanghui, W. Xuexia,** et al // Neural Networks and Signal Processing. - China, 2003. - Vol. 1. - P. 257–260.
7. **Wong M.L.D., Nandi A.K.** Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm // Signal Processing. - Liverpool, UK, 2004. – N 84. – P. 351 – 365.
8. **Hassan K., Dayoul B., Hamouda W., Berbineau M.** Automatic Modulation Recognition Using Wavelet Transform and Neural Networks in Wireless Systems // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. - Cairo, Egypt, 2010. – Vol. 2010, Article ID 532898. - 13 p.

Институт радиофизики и электроники НАН РА, ООО “Олимп Энджинеринг”.
Материал поступил в редакцию 10.05.2017.

Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ, Օ.Ժ. ՍԵՎՈՅԱՆ, Ա.Մ. ԹԱՆԹՈՒՇՅԱՆ

ԱՐԶԵՍՏԱԿԱՆ ՆԵՐՈՆԱՑԻՆ ՑԱՆՑԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ՄՈԴՈՒԼԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՃԱՆԱՉՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ

Մոդուլացումների ավտոմատացված ճանաչման (ՄԱՃ) նպատակն է ճանաչել ընդունված ազդանշանի մոդուլացման տեսակը՝ առանց նրա մասին որևէ սկզբնական տվյալների: ՄԱՃ-ը շատ կարևոր խնդիր է, քանի որ ապամոդուլարարի համար չափազանց կարևոր է իմանալ ընդունված ազդանշանի ճիշտ մոդուլացման տեսակը: Խնդրի լուծման համար գոյություն ունեն մի քանի մեթոդներ և հնարքներ, որոնցից են արհեստական նեյրոնային ցանցերը (ԱՆՑ): Աշխատանքում նկարագրված են ԱՆՑ-երը՝ հետագա մոդուլացումների ավտոմատացված ճանաչման խնդրի լուծման ալգորիթմի մշակման նպատակով:

Առանցքային բառեր. արհեստական նեյրոնային ցանցեր, մոդուլացումների ավտոմատացված ճանաչում, նմուշի ճանաչման մեթոդ, սխալի հակադարձ տարածում:

A.G. GHULYAN, O.ZH. SEVOYAN, A.M. TANTUSHYAN

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND THEIR APPLICATION IN AUTOMATIC MODULATION RECOGNITION

The goal of automatic modulation recognition (AMR) is to recognize the received signal's modulation type without any prior data. ARM is a very important task, since it is vital for the demodulator to know the received signal's exact modulation type. There are several methods and technologies to solve this task, one of which is artificial neural networks (ANN). ANNs are described in this work for the purpose of automatic modulation recognition algorithm future development.

Keywords: artificial neural networks, automatic modulation recognition, pattern recognition method, error backpropagation.

В.С. АРАКЕЛЯН

МИКРОВОЛНОВЫЙ ИНФРАЗВУКОВОЙ СЕНСОР

Предлагается новый тип инфразвуковых сенсоров с высокой чувствительностью ($\sim 10^7 \text{ Гц/Па}$) и широким динамическим диапазоном ($> 108 \text{ дБ}$) без ограничения по низкой частоте инфразвука на основе микроволнового коаксиального резонатора, нагруженного на емкость. Приведены методика расчета таких сенсоров и результаты статических испытаний изготовленного датчика на частоте $2,5 \text{ ГГц}$. Проведенные испытания показали соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: инфразвук, микроволны, коаксиальный резонатор, сенсор.

Введение. Инфразвуковые волны с частотой от 20 Гц и ниже излучаются в результате любых возмущений атмосферы, распространяются в атмосфере на сотни километров и могут проникать сквозь любые препятствия без существенных потерь. Необходимость разработки высокочувствительных инфразвуковых сенсоров определяется их широким применением в авиации для фиксирования и измерения турбулентных потоков, в метеорологии для предсказания шторма и торнадо, в медицине, а также при проведении антитеррористических операций [1-3].

Поэтому разработка высокочувствительного инфразвукового сенсора с широким динамическим диапазоном является актуальной задачей.

В настоящее время для этих целей широко используются пьезоэлектрические сенсоры, микробарометры и микроволновые объемные резонаторы с подвижной стенкой. Каждый из вышеперечисленных сенсоров имеет свои недостатки. Микробарометры и пьезоэлектрические сенсоры имеют высокий уровень собственных шумов, ограничение на низкие ($< 0,1 \text{ Гц}$) инфразвуковые частоты, их параметры зависят от флуктуаций питающего напряжения и электромагнитных наводок. Сенсоры на основе микроволновых резонаторов с подвижной стенкой в широком динамическом диапазоне имеют недостаточную чувствительность [4-6].

Преимуществами высокочастотных емкостных сенсоров, работающих в гигагерцовом диапазоне частот, являются высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, защищенность от любого типа шумов, слабая зависимость от флуктуаций напряжения питания, отсутствие ограничения на нижнюю границу частотного диапазона инфразвука, а также малые размеры и высокая воспроизводимость при массовом изготовлении.

Резонаторный метод основан на размещении колеблющегося объекта в высокочастотном поле микроволнового резонатора, что приводит к изменению его резонансной частоты. Высокая чувствительность в случае применения микроволновых резонаторов достигается работой сенсора на сверхвысоких частотах (СВЧ) с использованием двухканальной схемы измерения с опорным резонатором и измерением разностной частоты [7].

В данной работе для создания высокочувствительных инфразвуковых сенсоров предлагается использовать два СВЧ резонатора коаксиального типа, реализованные в одном корпусе, что позволяет избежать проблем, связанных с термостабилизацией. Один из резонаторов является измерительным, а второй – опорным.

Измерительный резонатор реализован на основе коаксиального резонатора, нагруженного на емкость, образованную центральной частью коаксиала и мембраной. Чувствительным элементом является мембрана, а изменения емкости, образованной центральным проводником коаксиала и мембраной, деформируемой под действием инфразвука, приводят к изменению резонансной частоты микроволнового резонатора.

В работах [8,9] коаксиальный резонатор использовался в качестве дилатометра для измерения сверхмалых ($\sim 10^{-4} \text{Å}$) перемещений, что говорит о высокой чувствительности данного метода измерений.

1. Чувствительность сенсора. Исходя из условия резонанса для коаксиальных резонаторов [10], нагруженных на емкость, с учетом формулы емкости воздушного плоскопараллельного конденсатора и в приближении малого изменения величины $\cot(\omega l/c)$ под действием смещения мембраны [11], вызванного воздействием инфразвука, получим выражение для чувствительности сенсора

$$\frac{\Delta f}{\Delta p} = \frac{\Delta d}{d} \frac{\cot(\omega l/c)}{2\pi ZC} = \frac{(1-\mu^2)R^4}{16E\delta^3r^2} \frac{\cot(\omega l/c)}{2\pi^2 Z\epsilon_0}, \quad (1)$$

где l – длина коаксиального резонатора; c – скорость света; Z – волновое сопротивление резонатора; ϵ_0 – электрическая постоянная; r – радиус центральной части коаксиального резонатора; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; R и δ – соответственно радиус и толщина мембраны, m ; Δp – изменение давления, Pa ; Δf – изменение частоты, $Гц$.

Полагая $Z = 75 \text{ Ом}$ и подставляя соответствующие константы для мембраны из бронзы, получим

$$\frac{\Delta f}{\Delta p} \approx 4,34 \cdot 10^{-5} \frac{R^4}{r^2\delta^3} \cot(\omega l/c). \quad (2)$$

Как видно из (2), чувствительность сенсора прямо пропорциональна $R^4/(r^2\delta^3)$, поэтому выбор величин r и δ определяется необходимой чувствительностью сенсора, а максимальный радиус мембраны $R_{\text{макс}}$ определяется из требования, чтобы ее первая резонансная частота была выше верхней частоты принимаемого инфразвукового сигнала.

2. Динамический диапазон сенсора. Динамический диапазон сенсора зависит от величины упругой деформации мембраны. Допустимое (упругое) перемещение мембраны определяется величиной [11]

$$\Delta d_{\text{макс}} = 0,655 R \sqrt[3]{\frac{\Delta p R}{E \delta}}. \quad (3)$$

В случае необходимости расширения динамического диапазона возможно применение сильфона с пружиной, что обеспечивает линейность зависимости перемещения от давления в более широком диапазоне давлений. В качестве измерителя в этом случае возможно применение цилиндрического конденсатора.

Изменение резонансной частоты в случае применения цилиндрического конденсатора

$$\Delta f = \frac{\Delta l_c}{l_c} \frac{\cot(\omega l/c)}{2\pi C Z} \quad (4)$$

пропорционально величине $\Delta l_c/l_c$, где l_c – длина цилиндрического конденсатора; $\Delta l_c = -\Delta p S/k$; C – емкость цилиндрического конденсатора; S – площадь поверхности сильфона; k – жесткость пружины.

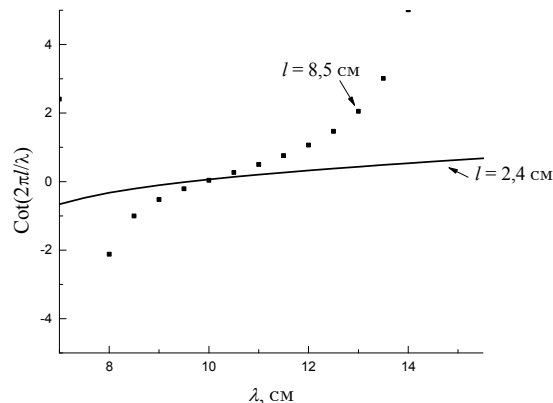


Рис. 1. Зависимость $\cot(2\pi l/\lambda)$ от длины волны для двух значений длин резонатора l

В случае применения сильфонов необходимо учесть то обстоятельство, что резонансная частота под воздействием инфразвука может изменяться в

более широком диапазоне частот. На рис. 1 изображена расчетная зависимость $\cot(2\pi l/\lambda)$ от λ для двух значений длин резонатора $l = 8,5$ см и $l = 2,4$ см.

Как видно из рисунка, в случае использования резонаторов $l = l_0 + \lambda/2$ ($l = 8,5$ см) крутизна, а значит, и чувствительность датчика существенно выше, однако линейность отклика ниже, чем при использовании коротких резонаторов.

3. Выбор длины резонатора. Для резонанса на длине волны λ_0 в отсутствие изменения давления, обусловленного инфразвуком, длина резонатора l_0 равна [12]

$$l_0 = \frac{\lambda_0}{2\pi} \arctan\left(\frac{5,3\lambda_0}{ZC}\right) + \frac{\lambda_0}{2}, \quad (5)$$

где l_0 – длина резонатора, см; λ_0 – длина волны, см; C – емкость, пФ; Z – волновое сопротивление резонатора, Ом.

Как видно из (5), длина резонатора зависит от длины волны λ_0 , емкости C и волнового сопротивления Z . В случае, когда волновое сопротивление $Z = 75$ Ом, длина резонатора для определенной λ_0 зависит только от C . Из (1) видно, что чувствительность датчика тем больше, чем меньше емкость. График зависимости l от C приведен на рис. 2 для трех центральных длин волн: $\lambda_0 = 9,96$ см ($f = 3$ ГГц); $\lambda_0 = 12,2$ см ($f = 2,5$ ГГц), $\lambda_0 = 29,9$ см ($f = 1$ ГГц).

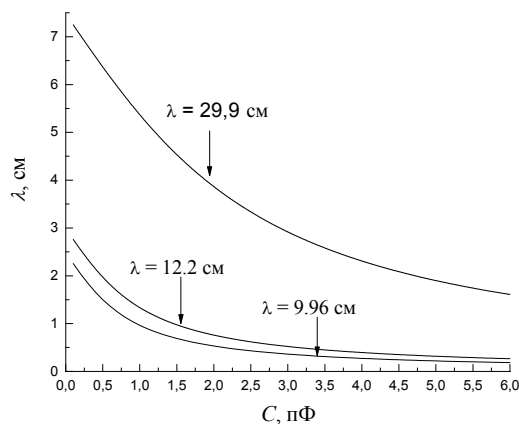


Рис. 2. График зависимости длины СВЧ резонатора от емкости для трех длин волн

Из рис. 2 видно, что чувствительность сенсора (крутизна кривой) растет с уменьшением длины волны (с повышением центральной частоты резонатора), и для получения высокой чувствительности необходимо выбрать длину резонатора, исходя из минимальной емкости. Кроме того, добротность коаксиального резонатора тем выше, чем меньше емкость [10]. Возьмем, для примера, центральную частоту резонатора 2,5 ГГц. Соответствующая длина волны $\lambda_0 = 12,2$ см. На рис. 3 показан график $\cot(\omega l/c)$ в зависимости от длины ре-

зонатора. Как видно из этого рисунка, в диапазоне длин резонатора 1,5...2,7 см зависимость $\cot(\omega l/c)$ от l можно аппроксимировать прямой линией. Очевидно, что для получения высокой чувствительности и максимального динамического диапазона необходимо работать в области длин резонатора 1,5...2,7 см.

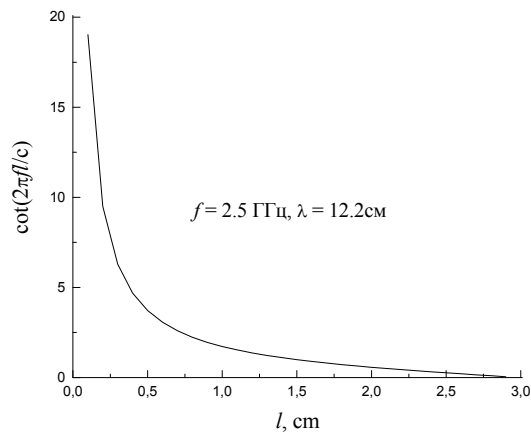


Рис. 3. Зависимость $\cot(\omega l/c)$ от длины резонатора

Проведены статические испытания изготовленных датчиков, состоящих из двух СВЧ коаксиальных резонаторов: опорного и измерительного, объединенных в один корпус и настроенных на резонансную частоту 2,5 ГГц, с длиной резонатора $l = 2,4 \text{ см}$. Фотография исследованного сенсора приведена на рис. 4.

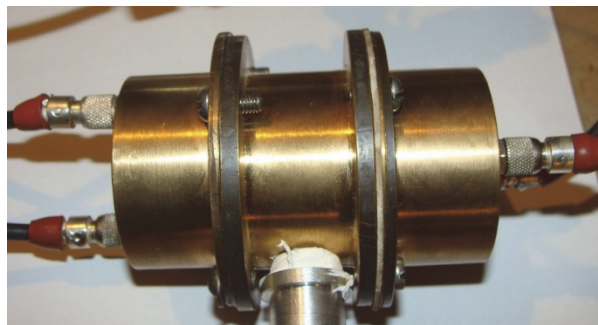


Рис. 4. Фотография исследованного сенсора

На рис. 5 приведен экспериментальный график зависимости смещения резонансной частоты сенсора с длиной резонатора $l = 2,4 \text{ см}$ для мембран из бронзы толщиной $\delta = 40 \text{ мкм}$ и $\delta = 60 \text{ мкм}$. Как видно из графика, линейность отклика сенсора на изменение давления удовлетворительна, а динамический диапазон превосходит 108 дБ.

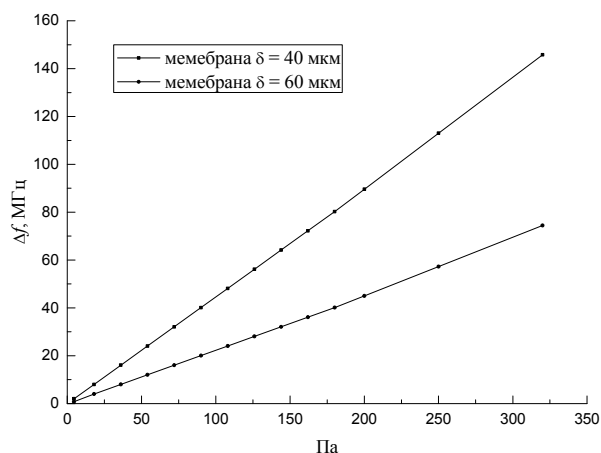


Рис. 5. Зависимость изменения резонансной частоты сенсора от изменения давления

Закключение. Таким образом, предлагается новый тип инфразвуковых сенсоров с высокой чувствительностью ($\sim 10^7$ Гц/Па) и широким динамическим диапазоном (> 108 дБ) без ограничения по низкой частоте инфразвука на основе микроволнового коаксиального резонатора, нагруженного на емкость. Приведена методика расчета таких сенсоров, позволяющая рассчитать и изготовить инфразвуковой сенсор высокой чувствительности с широким динамическим диапазоном. Проведенные статические испытания изготовленных датчиков, состоящих из двух СВЧ коаксиальных резонаторов - опорного и измерительного, объединенных в один корпус и настроенных на резонансную частоту $2,5$ ГГц, показали соответствие расчетных и экспериментальных данных в диапазоне давлений $4,5 \dots 320$ Па, использованных при проведении эксперимента. Их экстраполяция на малые давления порядка 10^{-3} Па дает в соответствии с приведенными выше расчетами смещение частоты $\sim 10^4$ Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NASA Technology Transfer Program. <https://technology.nasa.gov/ratent/LAR-TOPS-106>.
2. Monitoring and recognition of debris flow infrasonic signals / **Dun-long Liu, Xiao-Peng Leng, Fang-Qiang Wei, et al** // Journal of Mountain Science.- China, 2015.-12 (4). - P. 797-815.
3. **Pichon Lr., Blanc A., Hauchecome E.** Infrasound monitoring for atmospheric studies.- London, New York, Springer Dordrecht Heidelberg, 2009.- 731 p.
4. An optical fiber infrasound sensor: A new lower limit on atmospheric pressure noise between 1 and 10 Hz / **Mark A. Zumberge, Jonathan Berger, Michael A.H. Heldin, et al** // The J. Acoust. Soc. Am.- 2003.-113(5).- P. 2474 -2479.
5. **Фрайден Дж.** Современные датчики.- М.: Техносфера, 2005.- 592 с.

6. **Polivka J.** An Overview of Microwave Sensor Technology // High Frequency Electronics.- USA, 2007.- 4. P. 32-42.
7. **Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 708 с.
8. **Whiddington R.** The Ultra-Micrometer // Phil.Mag.- 1920.- 40 (289).- P. 634-639.
9. **Pudalov V.M., Khaikin M.S.** Dilatometr with a sensitivity of 10^{-4} Angstrom // Cryogenics.- 1969.-4.- P. 128-134.
10. **Лебецов И.В.** Техника и приборы сверхвысоких частот.- М., Л.: Гос. Энергетическое изд-во, 1961.- 818 с.
11. **Пономарев С.Д., Андреев Л.Е.** Расчет упругих элементов машин и приборов.- М.: Машиностроение, 1980.- 329 с.
12. **Орлов С.И.** Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов.- М.: Радио, 1970.- 256 с.

Институт физических исследований НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.05.2017.

Վ.Ս. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ

ՄԻԿՐՈԱԼԻՔԱՅԻՆ ԻՆՖՐԱՉԱՅՆԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐ

Առաջարկվում է բարձր զգայնությամբ $\sim 10^7$ Հց/Պա և լայն դինամիկական տիրույթով (> 108 դԲ) ինֆրաձայնային սենսորների նոր տեսակ, առանց ինֆրաձայնի ցածր հաճախությամբ սահմանափակման, կոաքսիալ միկրոալիքային ռեզոնատորի հիման վրա՝ բեռնված ունակությամբ: Ներկայացված են նման սենսորների հաշվարկի մեթոդիկան և պատրաստված տվյալի ստատիստիկական փորձարկումների արդյունքները 2,5 ԳՀց հաճախության դեպքում: Կատարված փորձարկումները ցույց են տվել հաշվարկային և փորձարկական տվյալների համապատասխանությունը:

Առանցքային բառեր. ինֆրաձայն, միկրոալիքներ, կոաքսիալ ռեզոնատոր, սենսոր:

V.S. ARAKELYAN

A MICROWAVE INFRASOUND SENSOR

A new type of infrasound sensors based on coaxial resonator loaded by a capacity with high sensitivity ($\Delta f \approx 10^7$ Hz/Pa) and wide dynamic range (>108 dB) without a low infrasound frequency limit are proposed. The calculation method of such sensors and the results of static tests are introduced. The tests have showed the agreement between the calculated and experimental data.

Keywords: infrasound, microwaves, coaxial resonator, sensor.

С.О. СИМОНЯН, А.А. АЙВАЗЯН

**ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ
ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА РИККАТИ**

Предложены декомпозиционные аналитический и численно-аналитический методы решения алгебраических однопараметрических матричных уравнений типа Риккати, основанные на итерационных вычислительных схемах и дифференциальных преобразованиях (ДИВС+ДП). Получены условия разрешимости задачи. Рассмотрен модельный пример, демонстрирующий вычислительную эффективность численно-аналитического метода.

Ключевые слова: алгебраическое однопараметрическое матричное уравнение типа Риккати, редукция задачи, декомпозиционная итерационная вычислительная схема, дифференциальные преобразования, численно-аналитический метод решения, условия разрешимости задачи, модельный пример.

Введение. В работе [1] были предложены методы решения алгебраических однопараметрических матричных уравнений типа Риккати, основанные на аппаратах кронекеровых произведений матриц [2] и дифференциальных преобразований [3,4]. В настоящей работе рассматриваются декомпозиционные аналитический и численно-аналитический методы решения таких же уравнений, однако основанные на итерационных вычислительных схемах и дифференциальных преобразованиях.

Математический аппарат. Рассмотрим алгебраическое однопараметрическое матричное уравнение типа Риккати

$$X(t) \cdot D(t) \cdot X(t) + A(t) \cdot X(t) + X(t) \cdot B(t) = C(t), \quad (1)$$

где $D(t), A(t), B(t), C(t)$ - однопараметрические (функциональные) матрицы порядка m , а $X(t)$ - неизвестная матрица того же порядка, подлежащая определению.

1. Редукция и аналитическое решение. Однопараметрические матрицы $D(t), A(t), B(t), C(t)$ и $X(t)$ представим в виде следующих комплексных соотношений:

$$D(t) = D_1(t) + j \cdot D_2(t), \quad (2)$$

$$A(t) = A_1(t) + j \cdot A_2(t), \quad (3)$$

$$B(t) = B_1(t) + j \cdot B_2(t), \quad (4)$$

$$C(t) = C_1(t) + j \cdot C_2(t), \quad (5)$$

$$X(t) = X_1(t) + j \cdot X_2(t), \quad (6)$$

где $D_1(t), A_1(t), B_1(t), C_1(t), X_1(t)$ и $D_2(t), A_2(t), B_2(t), C_2(t), X_2(t)$ - матрицы порядка m действительных и мнимых частей соотношений (2)-(6) соответственно. Тогда преобразование нелинейного матричного уравнения (1) с учетом (2)-(6) приводит к следующей системе матричных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} X_1(t) \cdot D_1(t) \cdot X_1(t) - X_2(t) \cdot D_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot D_2(t) \cdot X_2(t) - \\ - X_2(t) \cdot D_1(t) \cdot X_2(t) + A_1(t) \cdot X_1(t) - A_2(t) \cdot X_2(t) + X_1(t) \cdot B_1(t) - \\ - X_2(t) \cdot B_2(t) = C_1(t), \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_1(t) \cdot D_1(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot D_2(t) \cdot X_2(t) + X_1(t) \cdot D_2(t) \cdot X_1(t) + \\ + X_2(t) \cdot D_1(t) \cdot X_1(t) + A_1(t) \cdot X_2(t) + A_2(t) \cdot X_1(t) + X_2(t) \cdot B_1(t) + \\ + X_1(t) \cdot B_2(t) = C_2(t). \end{cases} \quad (8)$$

Нетрудно убедиться, что систему (7), (8) можно представить также в виде следующего гиперматрично-блочного эквивалента:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} D_1(t) & -D_2(t) \\ D_2(t) & D_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} + \begin{bmatrix} A_1(t) & -A_2(t) \\ A_2(t) & A_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} \\ & + \begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} = \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix}_{2m \times m} \end{aligned} \quad (9)$$

или в компактной записи:

$$\tilde{X}(t) \cdot \tilde{D}(t) \cdot \bar{X}(t) + \tilde{A}(t) \cdot \bar{X}(t) + \tilde{X}(t) \cdot \bar{B}(t) = \bar{C}(t). \quad (10)$$

Замечание 1. Матрицы $\tilde{X}(t), \tilde{D}(t)$ и $\tilde{A}(t)$, очевидно, блочно-кососимметрические относительно первых главных диагоналей и блочно-симметрические относительно вторых главных диагоналей.

Замечание 2. Матричные уравнения (1) и (10) структурно подобны, однако содержательно достаточно различны: из-за различия квадратной матрицы $\tilde{X}(t)$ и прямоугольной матрицы $\bar{X}(t)$ с размерами $2m \times 2m$ и $2m \times m$ использование соответствующей кронекеровой матрицы с размерами $4m^2 \times 2m^2$ в общем случае приведет к наилучшему приближенному решению. В связи с этим обстоятельством появляется необходимость использования следующих итерационных вычислительных схем, порожаемых гиперматрично-блочным эквивалентом (10):

$$\bar{X}(t)_{(q+1)} = [\tilde{X}(t)_{(q)} \cdot \tilde{D}(t) + \tilde{A}(t)]_{2m \times 2m}^{-1} \cdot [\bar{C}(t) - \tilde{X}(t)_{(q)} \bar{B}(t)]_{2m \times m} \quad (11)$$

или

$$\tilde{X}(t)_{(q+1)} = [\bar{C}(t) - \tilde{A}(t) \cdot \bar{X}(t)_{(q)}]_{2m \times 2m} \cdot [\tilde{D}(t) \cdot \bar{X}(t)_{(q)} + \bar{B}(t)]_{m \times 2m}^+, \quad (12)$$

где q - номер итерации. Естественно, вычислительная схема (11) задает точные решения задачи и может быть реализована при выполнении условий регулярности

$$\text{rang}[\tilde{X}(t)_{(q)} \cdot \tilde{D}(t) + \tilde{A}(t)] = 2m, \forall q, \quad (13)$$

а вычислительная схема (12) из-за присутствия в ней обобщенных обратных матриц также задает наилучшие приближенные решения. Что касается точных решений, то они могут быть получены путем определения дополнительных корректирующих неизвестных [4], что достаточно обременительно с вычислительной точки зрения. Поэтому в дальнейшем будем оперировать лишь только вычислительными схемами типа (11), конечно, при выполнении условий регулярности (13). Заметим также, что итерационные вычислительные схемы (11) и (12) представляют, скорее всего, теоретический интерес и мало пригодны для практического применения (они могут быть реализованы лишь только при малых размерах входящих в них матриц и простых элементах последних). Однако универсальность известного метода замороженных коэффициентов (МЗК) позволяет использовать его для решения задачи выполнением следующих операций [4, стр. 99, 105]:

– в рассматриваемом интервале изменения параметра t выбираются изолированные точки $t_i, i = 1, 2, \dots$, и непрерывная задача (10) сводится к некоторому множеству числовых задач;

– решается каждая числовая задача с целью нахождения ее решений применением вычислительной схемы, порожденной схемой (11);

– используя полученные числовые решения, на основе применения некоторого метода теории аппроксимации находятся непрерывные решения редуцированной задачи (10), а следовательно, и решения исходной задачи (1).

Замечание 3. МЗК обычно характеризуется большой вычислительной трудоемкостью, связанной с решением множества числовых задач. Проблема особенно усугубляется при существовании разветвляющихся решений рассматриваемых задач [4, стр. 130]. Другие недостатки МЗК также хорошо известны [5, стр. 7,8]. В связи с этими обстоятельствами перейдем к иному подходу, основанному на дифференциальных преобразованиях [3,4].

2. Численно-аналитическое решение. Допустим, что все матрицы, входящие в (10), обладают достаточной степенью гладкости по параметру t , при котором имеют место следующие дифференциальные преобразования:

$$\tilde{D}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\tilde{D}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \tilde{D}(t) = \chi_1(t, t_v, H, \tilde{D}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (14)$$

$$\tilde{A}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\tilde{A}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \tilde{A}(t) = \chi_2(t, t_v, H, \tilde{A}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (15)$$

$$\bar{B}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\bar{B}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \bar{B}(t) = \chi_3(t, t_v, H, \bar{B}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (16)$$

$$\bar{C}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\bar{C}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \bar{C}(t) = \chi_4(t, t_v, H, \bar{C}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (17)$$

$$\tilde{X}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\tilde{X}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \tilde{X}(t) = \chi_5(t, t_v, H, \tilde{X}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (18)$$

$$\bar{X}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d\bar{X}^K(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad \bar{X}(t) = \chi_6(t, t_v, H, \bar{X}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (19)$$

где матричные дискреты

$$\tilde{D}(K) = \begin{bmatrix} D_1(K) & -D_2(K) \\ D_2(K) & D_1(K) \end{bmatrix}_{2m \times 2m}, K = \overline{0, \infty}; \quad (20)$$

$$\tilde{A}(K) = \begin{bmatrix} A_1(K) & -A_2(K) \\ A_2(K) & A_1(K) \end{bmatrix}_{2m \times 2m}, K = \overline{0, \infty}; \quad (21)$$

$$\bar{B}(K) = \begin{bmatrix} B_1(K) \\ B_2(K) \end{bmatrix}_{2m \times m}, K = \overline{0, \infty}; \quad (22)$$

$$\bar{C}(K) = \begin{bmatrix} C_1(K) \\ C_2(K) \end{bmatrix}_{2m \times m}, K = \overline{0, \infty}; \quad (23)$$

$$\tilde{X}(K) = \begin{bmatrix} X_1(K) & -X_2(K) \\ X_2(K) & X_1(K) \end{bmatrix}_{2m \times 2m}, K = \overline{0, \infty}; \quad (24)$$

$$\bar{X}(K) = \begin{bmatrix} X_1(K) \\ X_2(K) \end{bmatrix}_{2m \times m}, K = \overline{0, \infty}. \quad (25)$$

Замечание 4. Матрицы $\tilde{X}(K)$, $\tilde{D}(K)$ и $\tilde{A}(K)$, очевидно, блочно-кососимметрические относительно первых главных диагоналей и блочно-симметрические относительно вторых главных диагоналей.

Теперь с учетом правил матричной алгебры дифференциальных преобразований [4-6] и матричных дискретов (20)-(25) алгебраическое однопараметрическое матричное уравнение типа Риккати (10) из области оригиналов переведем в область дифференциальных изображений. Получим следующую гиперматрично-блочную спектральную модель:

$$\sum_{l=0}^K \tilde{X}(K-l) \sum_{m=0}^l \tilde{D}(m) \cdot \bar{X}(l-m) + \sum_{l=0}^K \tilde{A}(l) \cdot \bar{X}(K-l) + \sum_{l=0}^K \tilde{X}(K-l) \cdot \bar{B}(l) = \bar{C}(K), \quad (26)$$

откуда

при $K=0$:

$$\tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{A}(0) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \bar{B}(0) = \bar{C}(0),$$

следовательно,

$$\bar{X}(0)_{(q+1)} = \left[\tilde{X}(0)_{(q)} \cdot \tilde{D}(0) + \tilde{A}(0) \right]^{-1} \cdot \left[\bar{C}(0) - \tilde{X}(0)_{(q)} \cdot \bar{B}(0) \right], \quad (27)$$

что, очевидно, точно совпадает с (11) при некотором фиксированном центре аппроксимации t_v и выполнении условий регулярности

$$\text{rang} \left[\tilde{X}(0)_{(q)} \cdot \tilde{D}(0) + \tilde{A}(0) \right] = 2m, \quad \forall q; \quad (28)$$

при $K=1$:

$$\begin{aligned} & \tilde{X}(1) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(1) + \\ & + \tilde{A}(1) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{A}(0) \cdot \bar{X}(1) + \tilde{X}(1) \cdot \bar{B}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \bar{B}(1) = \bar{C}(1), \end{aligned}$$

откуда с учетом условий регулярности (28) получим

$$\begin{aligned} \bar{X}(1)_{(q+1)} = & \left[\tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) + \tilde{A}(0) \right]^1 \cdot \left[\bar{C}(1) - \tilde{A}(1) \cdot \bar{X}(0) - \right. \\ & \left. - \tilde{X}(0) \cdot [\tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(0) + \bar{B}(1)] - \tilde{X}(1)_{(q)} \cdot [\tilde{D}(0) \bar{X}(0) + \bar{B}(0)] \right]; \end{aligned} \quad (29)$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} & \tilde{X}(2) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(2) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(2) + \\ & + \tilde{X}(1) \cdot \tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(1) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(1) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(1) + \\ & + \tilde{A}(2) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{A}(1) \cdot \bar{X}(1) + \tilde{A}(0) \cdot \bar{X}(2) + \\ & + \tilde{X}(2) \cdot \bar{B}(0) + \tilde{X}(1) \cdot \bar{B}(1) + \tilde{X}(0) \cdot \bar{B}(2) = \bar{C}(2), \end{aligned}$$

откуда, в свою очередь, с учетом условий регулярности (28) получим

$$\begin{aligned} \bar{X}(2)_{(q+1)} = & \left[\tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) + \tilde{A}(0) \right]^1 \cdot \left[\bar{C}(2) - \tilde{A}(2) \cdot \bar{X}(0) - \tilde{A}(1) \cdot \bar{X}(1) - \right. \\ & - \tilde{X}(0) \cdot [\tilde{D}(2) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(1) + \bar{B}(2)] - \tilde{X}(1) \cdot [\tilde{D}(1) \cdot \bar{X}(0) + \\ & + \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(1) + \bar{B}(1)] - \tilde{X}(2)_{(q)} \cdot [\tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) + \bar{B}(0)] \Big]; \end{aligned} \quad (30)$$

⋮

при $K=K$:

$$\begin{aligned} & \tilde{X}(K) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(K) \cdot \bar{X}(0) + \tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(K) + \\ & + \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{X}(K-l) \sum_{m=0}^l \tilde{D}(m) \cdot \bar{X}(l-m) + \tilde{A}(0) \cdot \bar{X}(K) + \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{A}(K-l) \cdot \bar{X}(l) + \\ & + \tilde{X}(0) \cdot \bar{B}(K) + \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{X}(K-l) \cdot \bar{B}(l) = \bar{C}(K), = \bar{C}(K), \end{aligned}$$

откуда с учетом условий регулярности (28) имеем

$$\begin{aligned}
\bar{X}(K)_{(q+1)} = & \left[\tilde{X}(0) \cdot \tilde{D}(0) + \tilde{A}(0) \right]^1 \cdot \left[\bar{C}(K) - \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{A}(K-l) \cdot \bar{X}(l) - \right. \\
& - \tilde{X}(0) \cdot \left[\tilde{D}(K) \cdot \bar{X}(0) + \bar{B}(K) \right] - \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{X}(K-l) \cdot \bar{B}(l) - \\
& \left. - \sum_{l=0}^{K-1} \tilde{X}(K-l) \sum_{m=0}^l \tilde{D}(m) \cdot \bar{X}(l-m) - \tilde{X}(K)_{(q)} \cdot \tilde{D}(0) \cdot \bar{X}(0) \right].
\end{aligned} \tag{31}$$

Таким образом, имея матричные дискреты $\bar{X}(0), \bar{X}(1), \bar{X}(2), \dots, \bar{X}(K)$, в соответствии с (27), (29)-(31) с учетом (19) можно восстановить решение (6) задачи (1).

Модельный пример. Рассмотрим однопараметрическое матричное уравнение типа Риккати

$$X(t) \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ jt & t \end{bmatrix} \cdot X(t) + X(t) \cdot \begin{bmatrix} 1 & (1+j) \\ -t & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (t^2 - 2jt) & (1+j \cdot t) \\ jt & (-t - t^2 + jt^2) \end{bmatrix},$$

решенное в [1] численно-аналитическим методом, основанным на кронекеровых произведениях матриц и дифференциальных преобразованиях. Здесь представим результаты решения этой задачи декомпозиционным численно-аналитическим итерационным методом.

При $t_v = 1$, $H=1$ имеем

$$D_1(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_2(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_1(K) = D_2(K) = [0], \quad \forall K \geq 1;$$

$$A_1(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_1(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1(K) = A_2(K) = [0], \quad \forall K \geq 2;$$

$$B_1(0) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(1) = [0],$$

$$B_1(K) = B_2(K) = [0], \quad \forall K \geq 2;$$

$$C_1(0) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}, \quad C_2(0) = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_1(1) = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}, \quad C_2(1) = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$C_1(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad C_2(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_1(K) = C_2(K) = [0], \quad \forall K \geq 3.$$

Организация вычислительных процедур согласно (27), (29), (30) и (31) с учетом выполнения условия регулярности (28) при многочисленных различных (в частности, трех) начальных приближениях матричных дискретов $\bar{X}(0)_{(0)}, \bar{X}(1)_{(0)}, \bar{X}(2)_{(0)}, \dots$ привела к результатам, представленным в табл. 1- 3.

Таблица 1

	$\bar{X}(0)_{(0)}$	$\bar{X}(0)_{(1)}$
1	$\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 1 & -1 \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	
2	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ \hline 0 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ \hline 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 0 \\ \hline 0 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$	

Таблица 2

	$\bar{X}(1)_{(0)}$	$\bar{X}(1)_{(1)}$
1	$\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -1 & 1 \\ \hline 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$	
2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ \hline 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	

Таблица 3

	$\bar{X}(2)_{(0)}$	$\bar{X}(2)_{(1)}$
1	$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -2 & -2 \\ \hline -1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix}$	
2	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ \hline 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ \hline 0 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$	

Следовательно, решение задачи выглядит так:

$$\begin{aligned}
 X(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot (t-1) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (t-1)^2 + \\
 &+ j \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (t-1) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (t-1)^2 \right) = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 + j(1+t-1) & j \\ 0 & (-1 - (t-1)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + jt & j \\ 0 & -t \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

что точно совпадает с решением, полученным в [1] отмеченным выше методом. Задача решена также МЗК. Покомпонентные представления матриц $X_1(t)$ и $X_2(t)$ при применении этих методов приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

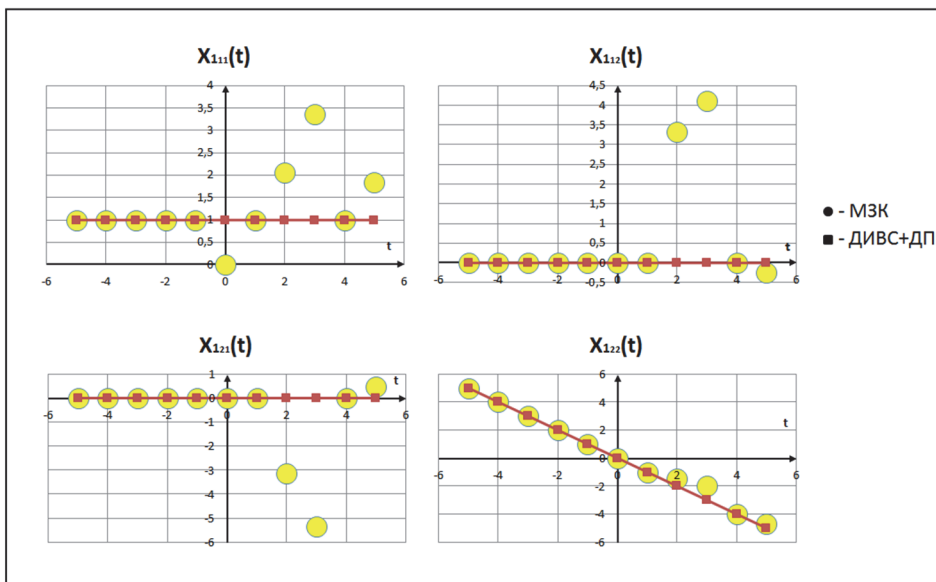


Рис. 1. Покомпонентное представление динамики элементов матрицы $X_1(t)$

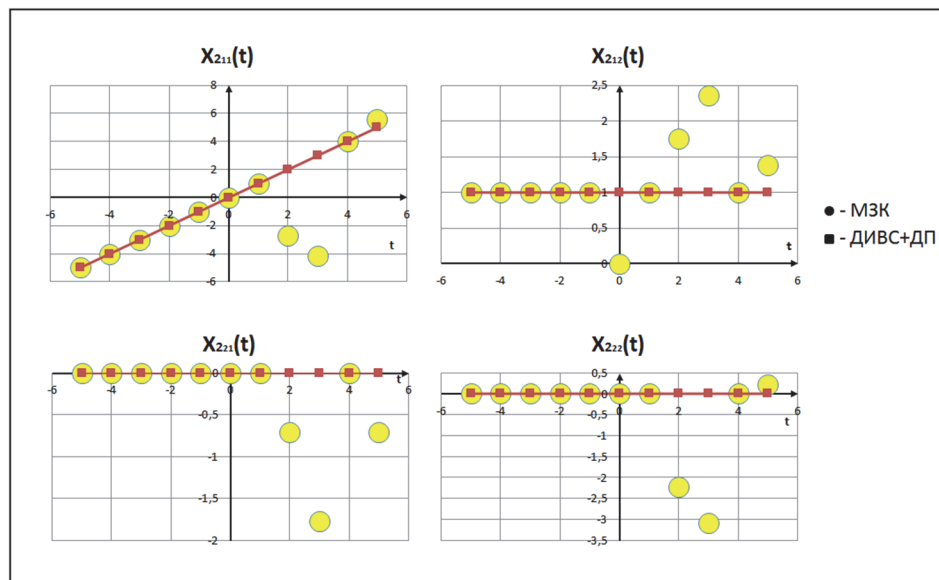


Рис. 2. Покомпонентное представление динамики элементов матрицы $X_2(t)$

Очевидно, что при МЗК наблюдаются некоторые отклонения от точного решения $X(t)$ на отдельных подынтервалах параметра t , что также является недостатком МЗК.

Заключение. Таким образом, решение рассматриваемой задачи предложенным декомпозиционным численно-аналитическим методом достаточно эффективно реализуемо современными средствами информационных технологий [7] и обеспечивает получение ее точных решений в отличие от общеизвестного МЗК, характеризующегося определенными вычислительными недостатками.

Исследование проведено в научно-исследовательской базовой лаборатории “Системный анализ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Симонян С.О., Айвазян А.А.** Методы решения алгебраических однопараметрических матричных уравнений типа Риккати // Известия НАН РА и НПУА. Серия ТН.-2017.- Т.LXX, № 2.- С. 235-247.
2. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. - М.: Наука, 2010.–560 с.
3. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений.- Киев: Наукова думка, 1984.- 420с.
4. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований.- Ереван: Изд.-во НПУА “Чартарагет”, 2010.- 361с.

5. **Симонян С.О.** Методы определения однопараметрических обобщенных обратных матриц.- Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017.- 222 с.
6. **Симонян С.О., Меликян А.В.** Алгебра матричных вычислений в области дифференциальных преобразований // Вестник ИАА.- 2017.- Т.14, №2.- С. 268-275.
7. **Moore H.** MATLAB for Engineers. 5th edition. - London: Pearson, 2017.- 688 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 05.06.2017.

Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՌԻԿԱՏԻ ՏԻՊԻ ՀԱՆՐԱՀԱՇՎԱԿԱՆ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ

Առաջարկվել են Ռիկկատի տիպի հանրահաշվական միապարամետրական մատրիցային հավասարումների լուծման անալիտիկ և թվա-անալիտիկ մեթոդներ, որոնք հիմնված են իտերացիոն հաշվողական սխեմաների և դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա (ԻՀՄ+ԴԶ): Ստացվել են խնդրի լուծելիության պայմանները: Դիտարկվել է մոդելային օրինակ, որը ցուցադրում է թվա-անալիտիկ մեթոդի հաշվողական արդյունավետությունը:

Առանցքային բառեր. Ռիկկատի տիպի հանրահաշվական միապարամետրական մատրիցային հավասարում, խնդրի ռեդուկցիա, դեկոմպոզիցիոն իտերացիոն հաշվողական սխեմա, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, լուծման թվա-անալիտիկ մեթոդ, խնդրի լուծելիության պայմաններ, մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN, A.A. AYVAZYAN

DECOMPOSITION METHODS FOR SOLVING RICCATI-TYPE ALGEBRAIC ONE-PARAMETRIC MATRIX EQUATIONS

Analytical and numerical-analytical methods are proposed for solving Riccati-type algebraic one-parametric matrix equations, which are based on decompositional iterative computational schemes and differential transformations (ICS & DT). Conditions for solvability of the problem are obtained. A model example is considered, which shows the computational productivity of the numerical-analytical method.

Keywords: Riccati-type algebraic one-parametric matrix equations, reduction of the problem, iterative computational scheme, differential transformations, numerical-analytical solution method, solvability conditions of the problem, model example.

Ա.Հ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

**ԿԻՔԵՌԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՈԼՈՐՏՈՒՄ ՕՊՏԻՄԱԼ ՆԵՐԴՐՈՒՄԱՅԻՆ
ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱՅԱՑՈՒՄԸ ՄԵԾ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Ներկայացված է մեծ անորոշության պայմաններում կիբեռանվտանգության ոլորտում ներդրումային որոշումների կայացման մոդելավորումը՝ Գորդոն-Լոբբի մոդելի ընդլայնմամբ: Ցույց է տրված, որ մեծ անորոշության պայմաններում կիբեռանվտանգության ոլորտում օպտիմալ որոշումների կայացման դեպքում էականորեն կարևոր են որոշում կայացնողի վերաբերմունքը անորոշության նկատմամբ, ներդրվող օպտիմալ գումարի չափը և ներդրումների կատարման ժամանակի օպտիմալ կառավարումը:

Առանցքային բառեր. կիբեռանվտանգություն, մեծ անորոշություն, օպտիմալ ներդրումային որոշումների կայացում, ժամանակի օպտիմալ կառավարում:

Ներածություն. Կիբեռանվտանգության ապահովման համար կատարվող ներդրումները այլ ոլորտներում կատարվող ներդրումներից տարբերվում են նրանով, որ կիբեռանվտանգության ոլորտում կատարվող ներդրումներից ստացվող եկամուտները դրամական չեն և արտահայտվում են կազմակերպության տեղեկատվական համակարգերի խոցելիության մակարդակի նվազեցմամբ: Բացի այդ, կիբեռանվտանգության ոլորտում կազմակերպության ներդրումային որոշումներն ունեն հետևյալ հատկանիշները. հնարավոր սպառնալիքներից բխող միջավայրն անորոշ է, կիբեռանվտանգության ոլորտում կատարված ներդրումներն ամբողջությամբ անվերադարձելի են, և կարևոր նշանակություն ունի ներդրում կատարելու որոշման կայացման պատեհաժամությունը [1]:

Մույն աշխատանքում մեծ անորոշության պայմաններում կիբեռանվտանգության ոլորտում օպտիմալ ներդրումային որոշումների կայացման մոդելավորումն իրականացվում է Գորդոն-Լոբբի ստատիկ մոդելի ընդլայնմամբ, որում առանձին պարամետրով ներկայացվում է որոշում կայացնողի վերաբերմունքը մեծ անորոշության նկատմամբ:

1. Դինամիկական ներդրումային որոշումների կայացումը մեծ անորոշության պայմաններում. Ներդրումների կատարման տեսանկյունից տեղեկատվական համակարգը բնութագրվում է երեք հիմնական պարամետրերով. առաջին՝ համակարգի խաթարման դեպքում λ դրամական կորուստները, երկրորդ՝ համակարգի խաթարմանն ուղղված սպառնալիքի ξ հավանականությունը, երրորդ՝ համակարգին բնորոշ խոցելիության ν հավանականությունը: Նշվածի հաշվառ-

մամբ համակարգի խաթարմանն ուղղված սպառնալիքի հաջող իրականացման դեպքում սպասվելիք L կորուստները կհաշվենք ($L = \xi\lambda$) բանաձևի միջոցով, իսկ տեղեկատվական համակարգի խոցելիության մակարդակը նվազեցնելու համար կազմակերպության կողմից ($z > 0$) դրամական միջոցների ներդրման դեպքում կունենանք ներդրումից հետո համակարգի $S(z, v)$ մնացյալ խոցելիության մակարդակը [2, 3]:

Ներդրումից սպասվելիք եկամուտը, այսինքն՝ ներդրումից սպասվելիք կորուստների նվազեցումը կհաշվենք հետևյալ բանաձևով.

$$EB(z) = (v - S(z, v))L, \quad (1)$$

իսկ սպասվելիք զուտ եկամուտը՝

$$ENB(z) = (v - S(z, v))L - z, \quad (2)$$

որտեղ $(v - S(z, v))$ -ն համակարգի խոցելիության մակարդակի նվազեցումն է:

[3]-ում ներկայացված մոդելային անորոշության հաշվառմամբ դիտարկենք այն դեպքը, երբ հավանականության չափման մեջ առկա է մեծ անորոշություն: Այսինքն՝ որևէ կոնկրետ հավանականության փոխարեն որոշում կայացնողը դիտարկում է հավանականությունների $\tilde{P}$ բազմություն [3-5], որը սահմանվում է նաև $\theta = (\theta_t)$ խտության գեներատորի՝ ստոխաստիկ պրոցեսների մի դասի միջոցով, որը կարող է օգտագործվել Q^θ հավանականության գեներացման համար: Նշենք նաև, որ $(\theta_t) \in \Theta$ խտության գեներատորները սահմանափակված են $K = [-k, k]$ ոչ ստոխաստիկ միջակայքով [3, 6], որը P օբյեկտիվ հավանականության շուրջ ձևավորում է հաստատուն մեծ անորոշության միջակայք [3, 7]: Նշենք նաև, որ անվտանգության խաթարմանն ուղղված ξ_t սպառնալիքը դրսևորվում է Բրոունյան շարժման նմանությամբ, հետևաբար, Գիբսսանովի թեորեմի համաձայն [3, 8, 9]՝ ցանկացած $(\theta \in \Theta)$ -ի համար գործում է.

$$d\xi_t = (\mu - \sigma\theta_t)\xi_t dt + \sigma\xi_t dw_t^\theta : \quad (3)$$

Դիտարկենք նաև [3]-ում ներկայացված որոշում կայացնողի վերաբերմունքը մեծ անորոշության նկատմամբ բնութագրող երկու ծայրահեղ նախապատվությունների համակցությունը, որը նկարագրվում է $\alpha \in [0, 1]$ պարամետրով, ինչպես նաև α -սպասվելիք արժեքը, որը կարելի է ներկայացնել հետևյալ արտահայտության միջոցով.

$$E^\alpha[f(x)] = \alpha \sup_{P \in \tilde{P}} E^P[f(x)] + (1 - \alpha) \inf_{P \in \tilde{P}} E^P[f(x)], \quad (4)$$

որտեղ $\tilde{P}$ -ն հնարավոր հավանականությունների բազմությունն է, իսկ $(f: x \rightarrow R)$ -ը՝ եկամուտը բնութագրող ֆինանսավճարային ստոխաստիկ ֆունկցիան: Նշվածի համաձայն՝ որոշում կայացնողը α կշռով դիտարկում է լավագույն հնարավոր սցենարը, իսկ $(1 - \alpha)$ կշռով՝ վատագույն սցենարը:

2. Օպտիմալ ներդրումների կատարումը մեծ անորոշության պայմաններում. Կիբեռանվտանգության ապահովման համար t ժամանակից հետո միանգամյա (ողջ կյանքի համար) ներդրումից ստացված եկամուտի f ֆունկցիան ներկայացնենք ապագա եկամուտների ընթացիկ արժեքի հաշվառմամբ.

$$f(\pi_t) = \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} \pi_s ds, \quad (5)$$

$$\pi_t = (v - S(z, v)) \lambda \xi_t, \quad (6)$$

որտեղ π_t ներդրումից սպասվելիք եկամուտն է, այսինքն՝ ներդրումից հետո սպասվելիք կորստի նվազեցումը, v -ն՝ համակարգի խոցելիության մակարդակը, ξ_t -ն՝ համակարգի խաթարմանն ուղղված սպառնալիքը, z -ը՝ անվտանգության ապահովման նպատակով կատարված ներդրման արժեքը, $S(z, v)$ -ն՝ ներդրումից հետո մնացյալ խոցելիության մակարդակը, իսկ ρ -ն՝ անընդհատ կուտակվող տոկոսադրույքը:

Այժմ ենթադրենք, թե v -ն և λ -ն ժամանակից կախված չեն, և անվտանգության ապահովման համար ներդրումը t ժամանակում կատարվում է միայն մեկ անգամ: Սրանից հետևում է, որ ներդրումից հետո մնացյալ խոցելիության մակարդակը՝ $S(z, v)$ -ն, նույնպես ժամանակից կախված չէ:

Փոխարինելով (3), (5) և (6) հավասարումները (4)-ով՝ կիբեռանվտանգության ապահովման նպատակով կատարված ներդրումից ստացվող α -սպասվելիք արժեքի համար կստանանք հետևյալ արտահայտությունը.

$$W\left(\frac{\xi_t}{\alpha}\right) = \alpha \sup_{Q^\theta \in \tilde{P}} E_t^{Q^\theta} \left[\int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} (v - S(z, v)) \lambda \xi_s ds \right] + \\ + (1 - \alpha) \inf_{Q^\theta \in \tilde{P}} E_t^{Q^\theta} \left[\int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} (v - S(z, v)) \lambda \xi_s ds \right]: \quad (7)$$

Նշենք, որ վերը նշվածի համաձայն՝ մեծ անորոշությունը մոդելավորվում է $\tilde{P} = \{Q^\theta / \theta \in \Theta\}$ հավանականությունների բաշխումների բազմության միջոցով, իսկ մեծ անորոշության աստիճանը բնութագրվում է $K = [-k, k]$ խտության գնե-րատորի միջակայքով [6]:

Կիբեռանվտանգության ապահովման համար կատարված ներդրման անորոշ եկամուտի հոսքով α -սպասվելիք արժեքը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ.

$$W(\xi_t / \alpha) = (v - S(z, v)) \lambda \xi_t \left(\frac{\alpha}{\rho - (\mu + \kappa \sigma)} + \frac{1 - \alpha}{\rho - (\mu - \kappa \sigma)} \right), \quad (8)$$

որտեղից երևում է, որ մեծ անորոշության բացակայության դեպքում, այսինքն՝ ($k = 0$), (8) հավասարումը կունենա հետևյալ տեսքը.

$$W_t = \frac{(v-S(z,v))\lambda\xi_t}{\rho-\mu} : \quad (9)$$

Հարմարավետության համար (8) հավասարման փակագծերում գրվածը փոխարինենք Ψ պարամետրով.

$$\Psi = \frac{\alpha}{\rho-(\mu+\kappa\sigma)} + \frac{1-\alpha}{\rho-(\mu-\kappa\sigma)} : \quad (10)$$

Արդյունքում՝ (10)-ի հաշվառմամբ (8) հավասարումը ներկայացնենք հետևյալ տեսքով.

$$W(\xi_t/\alpha) = (v - S(z, v))\lambda\xi_t\Psi : \quad (11)$$

Ուստի՝ կիբեռանվտանգության ապահովման համար ներդրման օպցիոնի արժեքը որոշելու համար որոշում կայացնողը կհամեմատի ներդրումից սպասվելիք $W(T_t/\alpha)$ եկամուտը z ներդրման արժեքի հետ.

$$F(\xi_t/\alpha) = \max\{W(\xi_t/\alpha) - z, 0\} = \max\{(v - S(z, v))\lambda\xi_t\Psi - z, 0\} \quad (12)$$

և $(v - S(z, v))\lambda\xi_t\Psi > z$ լինելու դեպքում ներդրումը կիրականացվի:

Կիբեռանվտանգության ապահովման համար օպտիմալ ներդրում կատարելիս անհրաժեշտ է հաշվել կազմակերպության տեղեկատվական համակարգը խաթարող սպառնալիքի կրիտիկական մակարդակը.

$$\xi^* = \frac{z}{(v-S(z,v))\lambda\Psi} = \frac{z}{(v-S(z,v))\lambda\left(\frac{\alpha}{\rho-(\mu+\kappa\sigma)} + \frac{1-\alpha}{\rho-(\mu-\kappa\sigma)}\right)} : \quad (13)$$

Հետևաբար՝ որոշում կայացնողը կիբեռանվտանգության ապահովման համար ներդրում կկատարի միայն ու միայն այն դեպքում, երբ ξ_t -ն գերազանցում է սպառնալիքի ξ^* կրիտիկական մակարդակը, հակառակ դեպքում՝ ներդրումը չի կատարվի:

3. Ներդրումների կատարման ժամանակի օպտիմալ կառավարումը մեծ անորոշության պայմաններում. Վերը դիտարկված մոդելի համաձայն՝ որոշում կայացնողը կիբեռանվտանգության ապահովման համար ներդրումը կատարում է միանգամից և ամբողջական կամ դադարեցնում է այն: Սակայն իրականում ներդրումային նախագծի իրականացումը հնարավոր է որոշակի ժամանակով հետաձգել՝ ներդրման համար ավելի բարենպաստ պայմանների ի հայտ գալու ակնկալիքով:

Ընդլայնենք վերը դիտարկված ներդրումային մոդելը՝ սահմանափակելով անհապաղ ներդրում կատարելու անհրաժեշտության պայմանը: Այս դեպքում ներդրում կատարելու օպտիմալ պահը որոշելը և ներդրումային նախագծից ստացվող եկամուտը $\tilde{t} \in [t, \infty)$ ժամանակում առավելագույնի հասցնելը դառնում են էականորեն կարևոր գործոններ:

Հարկ է նշել, որ մեծ անորոշության բացակայության պայմաններում ներդրումային խնդիրն ունի հետևյալ տեսքը.

$$F_t = \max_t E_t \left[\int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} (v - S(z, v)) \lambda \xi_s ds - e^{-\rho(\bar{t}-t)} z \right] : \quad (14)$$

Ընդհանուր առմամբ, (14) հավասարմամբ նկարագրվող խնդիրը անվերադարձելի դրամական միջոցներով պայմանավորված ներդրումային խնդիր է: Քանի որ անորոշ ժամանակով պայմանավորված ներդրումային խնդիրն ունի ռեկուրսիվ կառուցվածք, ապա այն կարելի է լուծել դինամիկ ծրագրավորման միջոցով [10]:

Սակայն, ի տարբերություն (12) հավասարմամբ նկարագրված մաքսիմացման խնդրի՝ որոշում կայացնողն այժմ առնչվում է հավանականությունների բաշխման $\tilde{P}$ բազմությանը: Արդյունքում, կիրառելով α -սպասվելիք արժեքի գաղափարը, ստացվում է հետևյալ մաքսիմացման խնդիրը.

$$F(\xi_t/\alpha) = \max_{t \in [t, \infty)} E_t^\alpha \left[\int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} (v - S(z, v)) \lambda \xi_s ds - e^{-\rho(\bar{t}-t)} z \right] : \quad (15)$$

Հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ $\tilde{P}$ բազմությունը քառակուսային է, ապա բացարձակ վատատեսության ($\alpha = 0$) կամ բացարձակ լավատեսության ($\alpha = 1$) դեպքերում այս երկու պայմաններն ունեն ռեկուրսիվ կառուցվածք [5]:

Այսպիսով՝ կարելի է ասել, որ բացարձակ լավատեսական ($\alpha = 1$) կամ բացարձակ վատատեսական ($\alpha = 0$) որոշումներ կայացնելու դեպքերում ներդրում կատարելու համար ընդունելի ընթացիկ շահույթի կրիտիկական մակարդակը՝ $(v - S(z, v)) \lambda \xi_t$ կունենա հետևյալ տեսքը.

$$(v - S(z, v)) \lambda \xi^* = \frac{b}{(b-1)\Psi} z, \quad (16)$$

որտեղ b -ն ստացվում է՝

$$b = \frac{1}{2} - \frac{\eta}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\eta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} > 1 \quad (17)$$

բանաձևով, իսկ η -ն՝

$$\eta = \alpha(\mu + \sigma k) + (1 - \alpha)(\mu - \sigma k) : \quad (18)$$

Ուստի՝ ներդրման օպցիոնն իրականացվում է, այսինքն՝ ներդրումը կատարվում է այն ժամանակ, երբ $(v - S(z, v)) \lambda \xi_t$ -ը գերազանցում է $(v - S(z, v)) \lambda \xi^*$ -ին: Հարկ է նշել, որ (16) հավասարումը շատ նման է մեծ անորոշության բացակայության պայմաններում ներդրում կատարելու կրիտիկական կետը նկարագրող հավասարմանը, որում $(v - S(z, v)) \lambda \xi$ -ն տրված է՝

$$(v - S(z, v))\lambda\xi = \frac{b}{b-1}z(\rho - \mu), \quad (19)$$

որտեղ b -ն հաշվվում է η -ն փոխարինելով μ -ով: Նշենք նաև, որ α և k պարամետրերից է կախված կրիտիկական մակարդակի՝ ստանդարտ դեպքից բարձր կամ ցածր լինելը: Մեծ անորոշության բացակայության կամ անորոշությունից խուսափելու ($\alpha = 0$) դեպքում կրիտիկական մակարդակը՝ $(v - S(z, v))\lambda\xi^*$ անորոշության առկայության պայմանում միշտ ավելի բարձր է, քան դրա բացակայության ժամանակ: Քանի որ ներդրում կատարելիս որոշում կայացնողի վերաբերմունքը ապագայի նկատմամբ հիմնականում գնահատվում է վատատեսական սցենարով [11], ուստի դրական ներդրումային որոշումների կայացման համար անհրաժեշտ է, որ նշված պայմանները հասնեն ավելի բարձր մակարդակների: Իհարկե, ($k = 0$)-ի դեպքում կրիտիկական մակարդակները համընկնում են: Այսպիսով՝ ներդրում կատարելու օպցիոնի արժեքը ստացվում է հետևյալ բանաձևով.

$$F(\xi_t/\alpha) = \frac{(b-1)(b-1)}{z^{(b-1)b}b} [(v - S(z, v))\lambda\xi_t\Psi]^b = \frac{(b-1)(b-1)}{z^{(b-1)b}b} [W(\xi_t)]^b, \alpha \in \{0; 1\}: \quad (20)$$

Իսկ ներդրում կատարելու օպտիմալ գումարը՝ z^* -ը ստացվում է (20)-ը ξ^* կրիտիկական մակարդակում մաքսիմացնելով.

$$z(\xi^*) = \operatorname{argmax}_{z \in R} F(\xi^*; z/\alpha): \quad (21)$$

Եզրակացություն: Կիբեռանվտանգության ոլորտում մեծ անորոշության պայմաններում ներդրումային որոշումների կայացումը բարդ և ստոխաստիկ գործընթաց է: Ուստի համապատասխան ներդրումային որոշումների կայացման համար անհրաժեշտ է մշակել ներդրումների դինամիկության, ներդրվող օպտիմալ գումարի չափի և ներդրումների կատարման ժամանակի օպտիմալ կառավարման հաշվառմամբ ավելի ճկուն և ռոբաստ մոդելներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Գրիգորյան Ա.Զ.** Կիբեռանվտանգության ոլորտում ներդրումների մոդելավորումը մեծ անորոշության պայմաններում // Հայկական բանակ. - 2016. - Հտ. 88, Հմ. 2. - Էջ 97-102:
2. **Gordon L.A., Loeb M.P.** The Economics of Information Security Investment // ACM Transactions on Information and System Security. - 2002. - Vol. 5, N. 4. - P. 438-457.
3. **Գրիգորյան Ա.Զ.** Կիբեռանվտանգության ապահովման ներդրումային մոդել՝ էական անորոշության պայմաններում // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. - 2017. - Հ. 70, N. 1. - Էջ 115-122:
4. **Epstein L.G., Wang T.** Intertemporal Asset Pricing under Knightian Uncertainty // Econometrica. - 1994. - Vol. 62, N. 2. - P. 283-322.
5. **Chen Z., Epstein L.G.** Ambiguity, Risk, and Asset Returns in Continuous Time // Econometrica. - 2002. - Vol. 70, N. 4. - P. 1403-1443.

6. **Nishimura K.G., Ozaki H.** Irreversible Investment and Knightian Uncertainty // Journal of Economic Theory. – 2007. – Vol. 136, N. 1. – P. 668–694.
7. **Schröder D.** Investment under Ambiguity with the Best and Worst in Mind // Mathematics and Financial Economics. – 2011. – Vol. 4, N. 2. – P. 107-133.
8. **Karatzas I., Shreve S.E.** Brownian Motion and Stochastic Calculus. - New York: Springer-Verlag, 1998. – 496 p.
9. **Duffie D.** Dynamic Asset Pricing Theory. - Princeton: Princeton University Press, 2001. – 472 p.
10. **Dixit A.K., Pindyck R.S.** Investment under Uncertainty. - Princeton: Princeton University Press, 1994. – 476 p.
11. **Gilboa I., Schmeidler D.** Maxmin Expected Utility with Non-Unique Prior // Journal of Mathematical Economics. – 1989. – Vol. 18, N. 2. – P. 141-153.

ՀՀ ՊՆ Պաշտպանական ազգային հետազոտական համալսարանի Ազգային անվտանգության քաղաքականության և տեղեկատվական – հաղորդակցային տեխնոլոգիաների կենտրոն: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.04.2017:

А.Г. ГРИГОРЯН

ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Проведено моделирование принятия инвестиционных решений в области кибербезопасности в условиях больших неопределенностей путем расширения инвестиционной модели Гордона-Лоэба. Показано, что отношение к большим неопределенностям лица, принимающего решение, определение оптимальной суммы инвестиций и оптимальное управление временем имеют важное значение в принятии оптимальных решений в области кибербезопасности в условиях больших неопределенностей.

Ключевые слова: кибербезопасность, большая неопределенность, принятие оптимальных инвестиционных решений, оптимальное управление временем.

A.H. GRIGORYAN

OPTIMAL INVESTMENT DECISION-MAKING IN THE SPHERE OF CYBERSECURITY UNDER AMBIGUITY

The modeling of taking investment decisions in the sphere of cybersecurity under ambiguity by the extension of the Gordon-Loeb investment model is introduced. It is shown that the attitude of the decision-maker to the ambiguity, the optimal amount of investment and the optimal timing are significant when making optimal investment decisions in the sphere of cybersecurity under ambiguity

Keywords: cybersecurity, ambiguity, optimal investment decision-making, optimal timing.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ Մ.Ա., ԳԱԼՈՅԱՆ Հ.Ա.

Հոծ եզ եռապլաված ԿԼՈՐ ՀԱՏՈՒՅԹՈՎ ՆՍՈՒՇՆԵՐԻ ԲԱՑ ՄԻՋԱՍԵՂՄՄԱՆ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ..... 259

ՄԱՀԱԿՅԱՆ Ա.Ա.

ՀԵՆԱՐԱՆԻ ԴԻՐՔԱՎՈՐՄԱՆ ՏԵՂԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԵՂՄՎԱԾ ՁՈՂԻ ԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆ
ՈՒԺԻ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ..... 272

ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Ղ.

ԿԼՈՐ ՀԱՏՈՒՅԹՈՎ ՓՈՐՁԱՆՄՈՒՇԻ ՄԵՂՄՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ
ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԻ ՊԼԱՍՏԻԿՈՒԹՅԱՆ ՀՈՍՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՄԲ 280

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ա.Ո.

ՊՂՆՁԻ ՀԻՄՔՈՎ ԴԻՄՊԵՐՍ ԿԱՐԾՐԱՑՈՂ ԵՎ ԱՄՐԱՑՎՈՂ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ
ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 289

ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ Ն.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Կ.Վ., ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Ն.,

ՄԱՐՈՅԱՆ Վ.Վ.

ՏԵՂԱԿԱՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ ԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ
ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 300

ՄԱՅԱՐՅԱՆ Վ.Ս., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Գ.Վ.

ՀԱՄԱՄԵՌ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԷՔՍՏՐԵՄԱԼ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ..... 308

ՌԱՅՅԱՆ Ռ.Ա., ՄԱՐՈՒԹՅԱՆ Ո.Զ.

ԳԱԶՏՈՒՐԲԻՆԱՅԻՆ ՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐՈՒՄ ՋՐԱՅԻՆ
ԳՈԼՈՐՇՈՒ ԹԵՐՄՈԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ 316

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Դ.

ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐՈՎ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐՈՒՄ ԾԱՆՐ ՎԹԱՐԻ ՆԵՐԻՐԱՆԱՅԻՆ ՓՈԼԼՈՒՄ
ՋՐԱԾԽԻ ԱՅՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ 323

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Կ.Ա., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Պ., ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ Գ.Գ., ԽԱՉԱՏՈՒՐՅԱՆ Վ.Գ.,

ՓԱՆՈՍՅԱՆ Ժ.Ռ., ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ Լ.Գ., ՄԵՎՈՅԱՆ Զ.Ս.

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԱՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ ԱՐԵԳԱԿԱՆ ՀԵՏԱԳԾԱՅԻՆ
ՄԱՐՔՈՎ..... 333

ԷԼԲԱԿՅԱՆ Ս.Հ.

ԱՅՐԻՉՆԵՐԻ ՀԱՐՄԱՐԱՂԱՄՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԶՈՏԻ ԹԵՐՄԻԿ ՕՔՍԻԴՆԵՐԻ
ԵԼՔԻ ՎՐԱ 340

ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Հ.Ս.

ԱՂՄՈՒԿԻ ԳԵՐՑԱԾՐ ՄԱԿԱՐԴԱԿՈՎ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ ՀԱՄԱՄԱՍՆ
ՈՒԺԵՂԱՐԱՐՆԵՐ ՑԱԾՐ ՃՆՇՄԱՆ ԲԱԶՄԱԼԱՐ ԽՅԻԿՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ 350

ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ., ՄԵՎՈՅԱՆ Օ.Ժ., ԹԱՆԹՈՒՇՅԱՆ Ա.Մ.

ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ՄՈԴՈՒԼԱՅՈՒՄՆԵՐԻ
ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՃԱՆԱՉՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ 358

ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Վ.Ս.

ՄԻԿՐՈԱԼԻՔԱՅԻՆ ԻՆՖՐԱՉԱՅՆԱՅԻՆ ՄԵՆՍՈՐ 366

ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՅՎԱԶՅԱՆ Ա.Ա.

ՌԻԿԿԱՏԻ ՏԻՊԻ ՀԱՆՐԱՀԱՇՎԱԿԱՆ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ
ՀԱՎԱՍՏԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՏԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ 373

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Հ.

ԿԻԲԵՌԱՆՎՅԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՈԼՈՐՏՈՒՄ ՕՊՏԻՄԱԼ ՆԵՐԴՐՈՒՄԱՅԻՆ ՈՐՈՇՈՒՄՆԵՐԻ
ԿԱՅԱՑՈՒՄԸ ՄԵԾ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ 384

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОСЯН Г.Л., МАРГАРЯН М.А., ГАЛОЯН Г.А. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТОЙ ПРОШИВКИ СПЛОШНОГО И СПЕЧЕННОГО ОБРАЗЦОВ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ.....	259
СААКЯН А.А. ВЛИЯНИЕ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОРЫ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ СЖАТОГО СТЕРЖНЯ.....	272
КАРАПЕТЯН А.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ КРУГЛОГО ОБРАЗЦА ПО ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА.....	280
АГБАЛЯН С.Г., САРКИСЯН А.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСНО-ТВЕРДЕЮЩИХ И УПРОЧНЯЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ.....	289
МЕЛИКСЕТИАН Н.Г., ОГАНЕСЯН К.В., КАРАПЕТЯН А.Н., САРОЯН В.В. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ.....	300
САФАРИАН В.С., АРУТЮНЯН Г.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РЕЖИМОВ ОДНОРОДНОЙ ЦЕПНОЙ СХЕМЫ.....	308
РАФЯН Р.А., МАРУХЯН В.З. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО ПАРА В ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТАХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК.....	316
ПЕТРОСЯН В.Г., ГРИГОРЯН А.Д. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В ЭНЕРГООБЛОКАХ С РЕАКТОРОМ ВВЭР-440 ПРИ ВНУТРИКОРПУСНОЙ СТАДИИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ.....	323
АВЕТИСЯН К.А., ВАРДАНИЯН Г.П., КИРАКОСЯН Г.Г., ХАЧАТУРЯН В.Г., ПАНОСЯН Ж.Р., КИРАКОСЯН Л.Г., СЕВОЯН Дж.С. УПРАВЛЕНИЕ ГЕЛИОТРЕКЕРОМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ.....	333
ЭЛБАКЯН С.Г. ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ ГОРЕЛОК НА ВЫХОД ТЕРМИЧЕСКИХ ОКСИДОВ АЗОТА.....	340
ВАРДАНИЯН Г.С. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УСИЛИТЕЛИ С УЛЬТРАНИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА ДЛЯ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	350
ГУЛЯН А.Г., СЕВОЯН О.Ж., ТАНТУШЯН А.М. ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ МОДУЛЯЦИЙ.....	358
АРАКЕЛЯН В.С. МИКРОВОЛНОВЫЙ ИНФРАЗВУКОВОЙ СЕНСОР.....	366
СИМОНЯН С.О., АЙВАЗЯН А.А. ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА РИККАТИ.....	373
ГРИГОРЯН А.Г. ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ.....	384

CONTENTS

PETROSYAN G.L., MARGARYAN M.A., GALOYAN H.A. COMPUTER MODELING OF THE OPEN BROACHING PROCESS OF THE ROUND SECTION SOLID AND SINTERED SAMPLES	259
SAHAKYAN A.A. THE INFLUENCE OF THE SUPPORT LOCATION ON THE VALUE OF CRITICAL LOAD OF THE COMPRESSED BAR	272
KARAPETYAN A.GH. INVESTIGATING THE UPSETTING PROCESS OF A CYLINDRICAL SAMPLE BY THE THEORY OF THE FLOW OF A POROUS MATERIAL PLASTICITY	280
AGHBALYAN S.G., SARKISYAN A.R. INVESTIGATING THE PROCESS OF HOT EXTRUSION OF POWDER COPPER-BASED DISPERSELY-HARDENING AND STRENGTHENING COMPOSITE MATERIALS	289
MELIKSETYAN N.G., HOVHANNISYAN K.V., KARAPETYAN A.N., SAROYAN W.V. TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS OF COMPOSITE POLYMER MATERIALS BY USING LOCAL CONCENTRATES	300
SAFARYAN V.S., HARUTYUNYAN G.V. INVESTIGATING THE EXTREME PROPERTIES OF THE HOMOGENEOUS LADDER CIRCUIT MODES	308
RAFYAN R.A., MARUKHYAN V.Z. DETERMINING THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF STEAM IN THERMAL CALCULATIONS OF GAS TURBINES	316
PETROSYAN V.G., GRIGORYAN A.D. ANALYSIS OF THE HYDROGEN COMBUSTION REGIMES AT NUCLEAR POWER UNITS WITH THE WWER-440 REACTOR AT AN IN-VESSEL STAGE OF A SEVERE ACCIDENT	323
AVETISYAN K.A., VARDANYAN G.P., KIRAKOSYAN G.G., KHACHATURYAN V.G., PANOSYAN ZH.R., KIARKOSYAN L.G., SEVOYAN J.S. CONTROLLING THE SOLAR POWER PLANT BY A HELIOTRACKER	333
ELBAKYAN S.H. THE INFLUENCE OF THE BURNER ARRANGEMENT ON THE EXIT OF THERMAL OXIDES OF NITROGEN	340
VARDANYAN H.S. FAST, LOW-NOISE AMPLIFIERS FOR LOW-PRESSURE MULTI-WIRE PROPORTIONAL CHAMBERS	350
GHULYAN A.G., SEVOYAN O.ZH., TANTUSHYAN A.M. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND THEIR APPLICATION IN AUTOMATIC MODULATION RECOGNITION	358
ARAKELYAN V.S. A MICROWAVE INFRASOUND SENSOR	366
SIMONYAN S.H., AYVAZYAN A.A. DECOMPOSITION METHODS FOR SOLVING RICCATI-TYPE ALGEBRAIC ONE- PARAMETRIC MATRIX EQUATIONS	373
GRIGORYAN A.H. OPTIMAL INVESTMENT DECISION-MAKING IN THE SPHERE OF CYBERSECURITY UNDER AMBIGUITY	384