

Ա. Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԳԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ  
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Իսունց Համլետ Արայիկի

Արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող մասնիկների փնջերի արտանցման  
պատուհանների ստացման նոր տեխնոլոգիայի մշակում

Ա.04.20 - «Փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական  
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2026

---

A. I. ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE LABORATORY  
(YEREVAN PHYSICS INSTITUTE)

Hamlet Isunts

Development of a new technology for manufacturing particle beam output windows in accelerator  
technology

SYNOPSIS

of Dissertation in 01.04.20 - "Beam physics and accelerator technology" presented for the degree of  
candidate in technical sciences


YEREVAN - 2026

Ատենախոսության թեման հաստատված է ՔԵՆՂԼ սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտի գիտական խորհուրդում:

Գիտական ղեկավար Տեխն. գիտ. դոկտոր	Վարդան Շավարշի Ավագյան (ՔԵՆՂԼ ՍՀԻ, ԱԱԳԼ)
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ Տեխն. գիտ. դոկտոր	Միքայել Սերյոժայի Ալեքսանյան (ԵՊՀ)
Տեխն. գիտ. դոկտոր	Բորիս Մերգելի Բալասանյան (ՀԱՊՀ)
Առաջատար կազմակերպություն	Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. մայիս 7-ին ժամը 12:00-ին ԱԱԳԼ-ում գործող ԲԿԳԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհուրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան Եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. ապրիլի 7-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար  
Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր  Հրաչյա Մարուկյան

---

The subject of the dissertation is approved by the scientific council of the CANDLE Synchrotron Research Institute.

Scientific Supervisor: Doctor of tech. sciences	Vardan Avagyan (CANDLE SRI, AANL)
Official Opponents: Doctor of tech. sciences Doctor of tech. sciences	Mikayel Aleksanyan (YSU) Boris Balasanyan (NPUA) Institute of Applied Problems of Physics
Leading Organization:	

The defence will take place on the 7<sup>th</sup> of May, 2026, at 12:00 during the "Physics" professional council's session of HESC 024 acting within AANL (2 Alikhanyan Brothers str., 0036, Yerevan).

The dissertation is available at the AANL library.  
The synopsis is sent out on the 7<sup>th</sup> of April, 2026.

Scientific Secretary of the Special Council:  
Doctor of ph-math. sciences  Hrachya Marukyan

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

### Աշխատանքի արդիականությունը

Տարրական մասնիկների արագացուցիչների արտանցման պատուհանները առանցքային դեր ունեն արագացուցչային տեխնիկայում: Ժամանակակից արագացուցիչներում էլեկտրոնային փնջերի դուրս բերումը վակուումից դեպի մթնոլորտ կամ գազային միջավայր կատարվում է արտանցման պատուհանների միջոցով: Սովորաբար արտանցման պատուհանները բաղկացած են լինում մետաղաթաղանից, երկու իրարից տարբեր կցաշտրթերից և խտարար օղակից: Կարող են հանգույցում մասնակցել նաև այլ միջանցիկ դետալներ: Պարզեցնելով հանգույցը կարելի է ասել, որ այն իրենից ներկայացնում է բարակ թաղանթ ամրացված խողովակաշարերին, և որի միջով անցնում է էլեկտրոնային փունջը: Այս հանգույցի նյութերը մեծ կարևորություն ունեն, քանի որ կախված հանգույցի կազմությունից և ընտրված նյութերից կարող են փոփոխվել ստացվելիք փնջի բնութագրերը և վակուումային հերմետիկության աստիճանը: Այսօր ավելի շատ օգտագործվում են տիտանի թաղանթից պատրաստված արտանցման պատուհանները, քանի որ այդ մետաղը ունի ավելի բարձր ամրություն և հուսալիություն, ինչպես նաև դիմացկունություն և թափանցելիություն էլեկտրոնային փնջերի նկատմամբ: Ինչպես նաև տիտանե մետաղաթաղանթը օժտված է բարձր էլեկտրաթափանցելիությամբ, համեմատած այլումինի և բերելիումի թիթեղների, որոնք տարածում են գտել արտանցման պատուհանների պատրաստման ժամանակ:

Տարրական մասնիկների արագացուցիչները հանդիսանում են բարդ սարքավորումներ և նրանք միավորում են գիտության և տեխնիկայի բազմապիսի բնագավառներ. ռադիոհաճախական համակարգեր, մագնիսական համակարգեր, վակուումային համակարգեր, ջերմակարգավորման համակարգեր, ճառագայթային ախտորոշման տեխնոլոգիաներ և այլն: Բոլոր համակարգերի և էլթախամակարգերի միայն արդյունավետ համադրությունն է հնարավորություն տալիս կառավարել արագացուցիչը և ստանալ ցանկալի արդյունք: Ըստ տարրական մասնիկների արագացուցիչների էներգիաիների, արտանցման պատուհանների մետաղաթաղանթների բնութագրերը (նյութ, հաստություն, տրամագիծ և այլն) տարբեր են: Մասնավորապես ՔՆՆՈՒ ԱՇԻ-ում շահագործվող ԱՐԵԱԼ գծային էլեկտրոնային արագացուցիչը մինչև 5 ՄԷՎ էներգիայով արագացուցիչ է, որի համար առանցքային է արտանցման պատուհանի հանգույցը:

Առավել հասկանալի է մետաղաթաղանթի երկու բնութագրերը. հաստությունը և դիմացկունությունը գերբարձր վակուումին: Ինչքան բարակ է մետաղաթաղանթը, այնքան քիչ են իր միջով անցնող փնջի բնութագրերի կորուստները: Բայց ինչքան բարակ է մետաղաթաղանթը, այնքան մեծ է վերջինիս խզման

(պատման) հավանականությունը: Կարելի է ասել, որ այս երկու բնութագրերը մրցակիցներ են:

Տիտանե մետաղաթաղանթները և CF կցաշուրթային հանգույցները լայնորեն կիրառվում են, սակայն դրանց վարքը մեխանիկական և վակուումային ազդեցությունների պայմաններում պահանջում է մանրակրկիտ ուսումնասիրություն: Արտանցման պատուհանի խափանումը կարող է հանգեցնել վակուումի կորստի և զգալի ֆինանսական կորուստների՝ սարքավորումների կանգի պատճառով: Հետևաբար, արտանցման պատուհանների համակարգչային և փորձարարական իմակարգված հետազոտությունը չափազանց արդիական է՝ արագացուցիչների հուսալի և արդյունավետ շահագործումն ապահովելու համար:

### **Աշխատանքի նպատակը և խնդիրները**

Աշխատանքի նպատակն է իրականացնել համակարգչային և փորձարարական հետազոտություններ արագացուցչային արտանցման պատուհանների համար: Հետազոտության առանցքային նպատակներն են.

- ուսումնասիրել արագացուցիչներում կիրառվող արտանցման պատուհանները, դրանց բաղկացուցիչ մասերը, կիրառվող նյութերը և երկրաչափությունները,
- համակարգչային մեթոդով հետազոտել արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի նյութը և հաստությունը,
- հետազոտել մետաղաթաղանթի՝ խտարար օղակից առաջ և հետո տեղակայման տարբերակները,
- ըստ ընտրված նախնական տվյալների իրականացնել արտանցման պատուհանի հանգույցի համակարգչային մոդելավորումներ, հաշվի առնելով հանգույցի և հերմետիկացման, և պոմպահանման գործընթացները: Մոդելավորումներն իրականացնել հանգույցի բոլոր մասերը ընդունելով որպես դեֆորմացվող,
- համակարգչային հետազոտությունների հիման վրա փորձարարական եղանակով իրականացնել առավել նախընտրելի արտանցման պատուհանի հանգույցի փորձարկումներ,
- ուսումնասիրել փորձարկումից առաջ, ընթացքում և հետո, հանգույցի դետալները:

### **Գիտական նորույթ**

Աշխատանքը իր բնույթով լուծում է արագացուցչային և, առհասարակ, վակուումային տեխնիկայում ծառայած մի շարք խնդիրներ: Համակարգչային և փորձարարական մեթոդով առաջին անգամ

- վերլուծվել և հստակեցվել է արագացուցչային արտանցման պատուհանների բաղկացուցիչ մասերը, վերջիններիս երկրաչափությունները, նյութը և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները: Կազմվել է արագացուցիչներում կիրառվող մետաղաթաղանթների ընդհանուր բնութագրերի աղյուսակ, որի միջոցով հստակեցվել ինչ-ինչ բնութագրերի բացակայությունը,
- ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի հանգույցը լարվածադեֆորմացիոն վիճակի (ԼԴՎ) տեսանկյունից,
- CAE ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱՕՄ) մոդելավորվել է տարբեր հաստությամբ տիտանի առաջին և երկրորդ դասի մետաղաթաղանթների ԼԴՎ-ը:
- CAE ԱՕՄ-ում հանգույցի բոլոր դետալները դիտարկվել են որպես դեֆորմացվող, ԱՕՄ-ում մոդելավորվել է արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը,
- տարբերակվել է մետաղաթաղանթի երկու դիրքով տեղակայմամբ արտանցման պատուհանները,
- համակարգչային և փորձարարական մեթոդներով հետազոտվել են արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի երկու դիրքերը (խտարար օղակից առաջ և հետո),
- գերճշգրիտ չափումների միջոցով ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի վարքը հերմետիկացման և պոմպահանման գործընթացներում,
- իրականացվել է համակարգչային և փորձարարական հետազոտությունների համեմատական վերլուծություն,
- գերճշգրիտ սարքավորման միջոցով սքանավորվել է հանգույցում մասնակցող չորս դեֆորմացնող եզրերը,
- մշակվել է նոր և պարզ երկրաչափությամբ կցաշուրթ արտանցման պատուհանի համար:

**Կիրառական նշանակությունը**

Ատենախոսական աշխատանքում ներկայացված վերլուծական, համակարգչային և փորձարարական արդյունքներն ունեն բավականին լայն կիրառական բնույթ: Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել արագացուցչային տեխնիկայում, վակուումային համակարգերում, ցանկացած բնագավառում, որտեղ կիրառվում են բարակ թաղանթներ և այլն: Մասնավորապես

- ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել ՍԷՎ-երի տիրույթի (փոքր էներգիաների) արագացուցիչներում,
- ատենախոսության մեջ ներկայացված արդյունքները կարող են կիրառվել ՔԵՆԴԼ ԱՀԻ-ում գործող ԱՐԵԱԼ գծային էլեկտրոնային արագացուցի վրա,

- առաջին գլխի հետազոտությունների հիման վրա կարելի է հստակ արտահայտված պատուհաններ կազմել ավելի լայն տիրույթով էներգիաների արագացուցիչների համար,
- առաջին և երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթների վերլուծությունները արված են այնպիսի ձևաչափով, որ ստացված արդյունքները կարելի է կիրառել ինչպես արագացուցչային տեխնիկայում, այնպես էլ այլ բնագավառներում, որտեղ օգտագործվում են տիտանե բարակ մետաղաթաղանթներ:

### Ատենախսության հիմնական դրույթները

Հիմնական դրույթներն են.

1. Ժամանակակից ՄԷՎ-երի հասնող արագացուցիչներում որպես արտահայտված պատուհանի մոդել նախընտրելի է 50 մկմ հաստությամբ, երկրորդ դասի տիտանի մետաղաթաղանթով, CF կցաշուրթ(եր)ով (ATLAS-ի փոխարեն), և ¼ ամրացված թթվածնազրկված պղնձից խտարար օղակով հանգույցը:
2. Նոր մշակված մոդելների դեպքում հանգույցին մասնակցող լրացուցիչ մեքենամասերը հենարան-ցանց, 2-րդ մետաղաթաղանթ, 2-րդ խտարար օղակ և հովացման համակարգ, անհրաժեշտ չեն:
3. Խտարար օղակից հետո տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում հանգույցը առավել կայուն է: Խտարար օղակից առաջ տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում CF կցաշուրթով հերմետիկացումը չի ապահովում անհրաժեշտ կայունություն:
4. Խտարար օղակից առաջ տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում անհրաժեշտ է նոր կերկրաչափությամբ դեֆորմացնող եզրով կցաշուրթ:

### Հրապարակումներ և գիտաժողովներ

Ատենախոսությունը հիմնված է հինգ հրապարակումների վրա, որոնցից երկուսը «Scimago Journal & Country Ranking (SJR)» պարբերականից են, ընդգրկված ամսագրերի դասակարգման առաջին (Q1) և երրորդ (Q3) քառորդներում (ներառված են և՛ Scopus, և՛ Web of Science միջազգային գիտական հանդեսների ցուցակում): Հրապարակումներից երկուսը պատկանում են ՀՀ ԲՈԿ-ի ցանկին պատկանող հոդվածների ժողովածուներում: Վերջին հրապարակումը տպագրվել է գիտաժողովի հիմքով: Հոդվածների ցանկը ավելի մանրամասն ներկայացված է վերջում:

Ստորև ներկայացված են ատենախոսությանը նվիրված գիտաժողովների վեց մասնակցությունները, որոնցից երկուսը միջազգային են:

1. Հ.Ա. Իսուց, Ա.Հ. Դավթյան, Վ.Շ. Ավագյան // Արագացուցչի էլքային պատուհանի առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթի ամրության

գնահատումը / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2022

2. Հ. Իսունց // Արտանցման պատուհանների բաղադրիչներին տրվող պահանջները արագացուցչային տեխնիկայում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան 90-ամյա հոբելյանին նվիրված տարեկան գիտաժողով / 2023
3. H. A. Isunts, V. Sh. Avagyan, A. I. Azizov, A. H. Grigoryan , A. S. Vardanyan, A. H. Davtyan // Stress-strain state analysis of the first-grade titanium foil of the accelerator output window in a static state / 15th international particle accelerator conference (IPAC'24) / 2024
4. Hamlet Isunts // Stress-strain research of the accelerator output windows with mechanical connection / The 4th International Workshop on “Ultrafast Beams and Applications” / 2024
5. Հ.Ա. Իսունց, Ա.Հ. Դավթյան, Վ.Շ. Ավագյան // Մեխանիկական միացմամբ արագացուցչային արտանցման պատուհանների փորձարկումը CAE ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2024
6. Հ. Իսունց, Վ.Եփրեմյան, Ա. Դավթյան // Արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող Ti Gr2 մետաղաթաղանթի ամրության գնահատումը ABAQUS ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2025

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՄՍ նախարարության Բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի աջակցությամբ (գիտական նախագիծ № 23AA-2D015): Թեմայի շրջանակներում ստացված արդյունքները ներկայացվել և քննարկվել են Գերմանիայի Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY հետազոտական կենտրոնի վակուումային և ինժեներական խմբերի ղեկավարների հետ, 15-օրյա գործուղման ընթացքում: Արդյունքները ներկայացվել են «Հայ-գերմանական ուսանողական դասընթացներ 2024»-ի և «Հայ-գերմանական ուսանողական դասընթացներ 2025»-ի ուսանողներին, «Վակուումային տեխնոլոգիաներն արագացուցիչներում» դասընթացների շրջանակներում:

### **Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլուխներից և 111 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 116 էջ, պարունակում է 46 նկար և 4 աղյուսակ: Ատենախոսության գլուխներն են.

**Գլուխ 1.** Արագացուցչային արտանցման պատուհանները, նրանց ղեկավարները և նախընտրելի նյութերը

**Գլուխ 2.** Առաջին և երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթներ

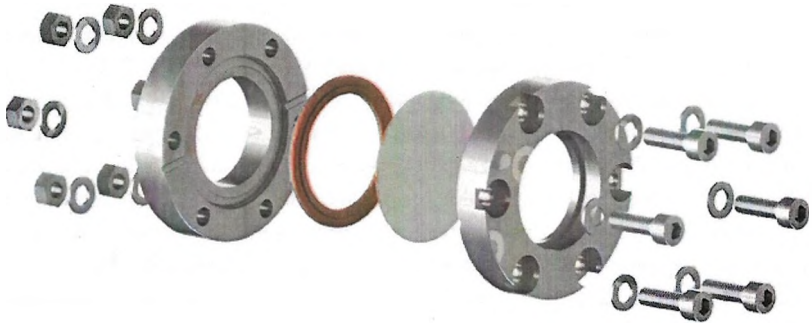
**Գլուխ 3.** Մարքավորումներ և մեքենաներ

**Գլուխ 4.** «Խտարար օղակից հետո և առաջ» տեղակայմամբ արտանցման պատուհաններ

## Աշխատանքի համառոտ բովանդակություն

*Ներածության* մեջ ներկայացված է արտանցման պատուհանը, նրա կազմությունը և առավել վտանգավոր գոտիները: Որպես օրինակ բերվում է «ԱՐԵԱԼ» գծային էլեկտրոնային արագացուցիչը և վերջինում արտանցման պատուհանի դերը: Այնուհետև ներկայացված է ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, նրա նպատակն ու խնդիրները, արդյունքների նորությունը և արդյունքների կիրառական նշանակությունը: Հաջորդիվ ներկայացված է բոլոր 4 գլուխների հակիրճ բնութագրությունները:

**Առաջին գլուխ:** Վերլուծվում է արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցի առանձին դետալները, քննարկվում դետալների հավանական տարբերակները, նյութերը և երկրաչափությունները: Նկ. 1-ում պատկերված է արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը:



*Նկ. 1. Արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը*

Ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի հավաքման եղանակները (քանդվող և չքանդվող միացությունների ձևով): Դիտարկվել է մետաղաթաղանթի խտարար օղակից առաջ և հետո տեղադրման դեպքերը: Այս գլուխը իր մեջ ներառում է ուսումնասիրություններ տարբեր արտանցման պատուհանների վերաբերյալ, որոնք մինչ այսօր կան գրականության մեջ: Մշակվել է ընդհանուր աղյուսակ, որը ներկայացնում է արտանցման պատուհանում կիրառվող մետաղաթաղանթի

ներկայիս վեճակը չափերը, հենարան ցանցի առկայությունը (առկայության դեպքում նյութը), փնջի էներգիան և էներգիայի կորուստը:

Քննարկվել է վակուումային հերմետիկության ապահովումը: Քանի որ պատուհանի հանգույցները կարող են հավաքվել տարբեր տեխնոլոգիաներով՝ մեխանիկական հերմետիկացում, վակուումային դիֆուզիոն միացում կամ գոդում, յուրաքանչյուր մեթոդ պետք է նախագծվի այնպես, որ ապահովի վակուումային վիճակ՝ հաշվի առնելով տվյալ տեխնոլոգիայի մեխանիկական և ջերմային սահմանափակումները:

Կատարված վերլուծությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետևյալ եզրակացությունները.

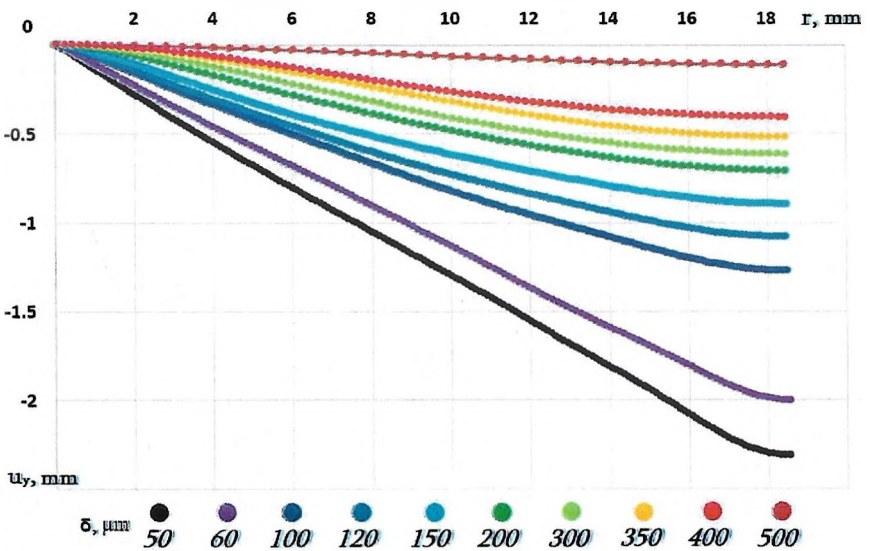
- KF տիպի կցաշտրթերը չեն ապահովում անհրաժեշտ վակուումային խտություն, նախընտրելի են CF տիպի կցաշտրթերը, բացառությամբ մշտական բարձր ջերմաստիճանային միացումների դեպքերի,
- տիտանի կիրառումը կցաշտրթերի պատրաստման համար տնտեսապես նպատակահարմար չէ,
- 304 և 304L տեսակի չժանգոտվող պողպատները տնտեսապես շահավետ են, թեև մեխանիկական առումով զիջում են 316 կամ 316L տեսակներին,
- ռետինե խտարար օղակները բարձր ջերմաստիճաններում չեն կատարում իրենց գործառույթը և պետք է խուսափել դրանցից,
- թթվածնազրկված բարձր հաղորդունակությամբ պղնձե (OFHC) խտարար օղակները նախընտրելի են, սակայն պահանջում են լրացուցիչ փորձարկումներ,
- պետք է ուսումնասիրվեն ինչպես փափուկ, այնպես էլ սովորական պղնձե խտարար օղակները,
- 1-ին դասի տիտանը կիրառելի է միայն ցածր էներգիաների դեպքում,
- 2-րդ և 5-րդ դասերի տիտանը խորհուրդ է տրվում բարձր պահանջներով կիրառությունների համար՝ իրենց բարձր ամրության և ջերմակայունության շնորհիվ:

Այս գլխի ուսումնասիրությունները ձևավորել էլ են ամուր հիմք արագացուցչային համակարգերում արտանցման պատուհանների հանգույցների օպտիմալացման համար և նպաստում են ծախսարդյունավետության, հուսալիության և արդյունավետության բարձրացմանը տարբեր միացման տեխնոլոգիաներում:

**Երկրորդ գլուխ:** Ուսումնասիրվել են արագացուցչային արտանցման պատուհաններում կիրառվող մետաղաթաղանթները: Աշխատանքներ են կատարվել ամրության առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթի ամրության գնահատման համար, փոփոխական բնութագիր ընտրելով մետաղաթաղանթի հաստությունը: Վերջինիցս կախված կատարվել է մոդելավորումներ ABAQUS UOՄ-ում վերջավոր տարրերի մեթոդով (ՎՏՄ): Ստատիկ վիճակում ուսումնասիրվել են 50...500 մկմ

միջակայքի 10 հաստությունների մետաղաթաղանթների՝ ճնշման տարբերությունից առաջացած գոգավորության պլաստիկ դեֆորմացիաների, շառավղային և շրջանային լարումների բաշխվածությունները, տեղափոխությունները: Ներմուծվել են տիտանի մետաղաթաղանթի հիմնական չափերը՝ հաստությունը, տրամագիծը: Ռոպես արտաքին ազդող ուժ կիրառվել է մթնոլորտային ճնշումը, իսկ վակուումի կողմից ճնշումն ընդունվել է գրո: Մետաղաթաղանթները բաժանվել են մեծ թվով հանգույցների, որով ապահովվել են մոդելավորումների մեծ ճշտությունները: Մոդելավորումների արդյունքում կառուցվել են Y առանցքի նկատմամբ մետաղաթաղանթի ընտրված կետերի տեղափոխությունների գրաֆիկները՝ կախված շառավղի մեծություններից, և մետաղաթաղանթի դեֆորմացիաների ինտենսիվության բաշխման կորերը, որոնք ևս վերլուծվել են:

ՎՏՄ-ով վերլուծությունից ստացված մոդելավորման արդյունքները ներկայացվել են թաղանթի ամրացված հատվածից մինչև կենտրոնական գոտին: Քանի որ թաղանթը գոգավորություն է ստանում դեպի վակուումի կողմը, և այդ կողմի հանգույցներն ունեն առավելագույն տեղաշարժեր, նպատակահարմար է լարվածա-դեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների արժեքները դիտարկել հենց այդ կողմից: Վերը նշված հանգույցների համար ստացվել են հետևյալ արդյունքները (նկ. 2):



Նկ. 2. Ընտրված հանգույցների տեղափոխությունները Y առանցքի նկատմամբ՝ կախված շառավղի արժեքներից

Արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթն ուսումնասիրվել է այնպես, որ մոդելավորումների արդյունքները կիրառելի լինեն արտանցման պատուհանների և մեխանիկական միացման, և դիֆֆուզիոն միացման դեպքերում:

Արդյունքների հիման վրա ստացվել է ֆունկցիա, որը հնարավորություն է տալիս ճշգրիտ հաշվարկել 1-ին դասի տիտանե թաղանթի կենտրոնի տեղաշարժը կախված դրա հաստությունից:

Ուսումնասիրելով արագացուցչային արտանցման պատուհանների առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթների լարվածադեֆորմացիոն վիճակը ստացվել են.

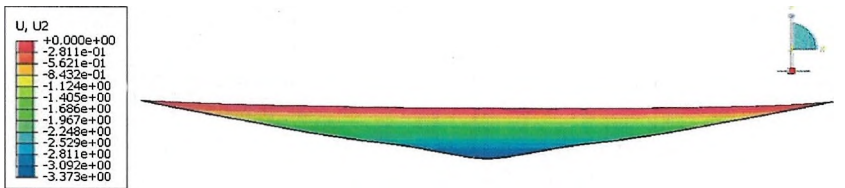
- 50...500 մկմ հաստությունների դեպքում դեֆորմացված վիճակներում մետաղաթաղանթների հատույթների ձևերը, որպես դրանց հանգույցների տեղափոխության կորեր,
- 60...100 մկմ միջակայքում գոյություն ունի մետաղանթի հաստության մի  $\delta_x$  արժեք, որից սկսած, վակուումի կողմից,  $\sigma_r$  և  $\sigma_\theta$  լարումները ընդունում են բացասական արժեքներ, այսինքն  $\delta > \delta_x$  դեպքում մետաղաթաղանթը հենարանում ենթարկվում է ծռման,
- $\delta_x$  հաստությունից սկսված մետաղաթաղանթի կենտրոնական հանգույցների պլաստիկ դեֆորմացիաները կտրուկ փոքրանում են, իսկ  $\delta < \delta_x$  հաստությունների համար պլաստիկ դեֆորմացիաները համեմատած  $\delta > \delta_x$  դեպքին, ընդունում են մեծ արժեքներ (օրինակ՝  $(\varepsilon_i^{100 \text{ մկմ}} / \varepsilon_i^{60 \text{ մկմ}}) \cdot 100\% \approx 27\%$ ),
- երբ  $\delta_x \leq \delta \leq \delta_y$ , ապա հենարանային հանգույցներում առկա են չնչին պլաստիկ դեֆորմացիաներ (0,56...0,001%),
- հաստությունների ընտրությունը պետք է կատարել  $\delta_{\min} < \delta < \delta_x$  միջակայքում, որի հստակեցման համար անհրաժեշտ է ուսումնասիրել նաև մետաղաթաղանթի դինամիկան,
- 150 մկմ հաստությունը ամրության տեսանկյունից հանդիսանում է նպատակահարմար ընտրություն,
- եթե պատուհանը ենթարկվելու է բարձր ջերմային ազդեցությունների, ապա խորհուրդ է տրվում կիրառել 300 մկմ հաստությամբ թաղանթ, որը կապահովի մոտավորապես 66 ՄՊա լրացուցիչ պաշար ջերմային լարվածությունների համար,
- մերիդիոնալ լարվածությունների մոդուլները թաղանթի արտաքին եզրային հանգույցներում ավելի մեծ են, քան շրջագծային լարվածությունները, մինչդեռ կենտրոնական հանգույցներում դրանք գրեթե հավասար են,
- մոտարկված ֆունկցիա, որը թույլ է տալիս խուսափել ժամանակատար մոդելավորումներից: Դրա օգնությամբ հնարավոր է բարձր ճշգրտությամբ հաշվարկել 1-ին դասի տիտանե թաղանթի կենտրոնական տեղաշարժը (մմ-երով) տարբեր հաստությունների (մկմ-ներով) դեպքում:

Այս գլխում նաև ուսումնասիրություններ են կատարվել արագացուցչային արտանցման պատուհաններում կիրառվող բարակ Ti Gr-2 տիտանե թաղանթների վարքի հետազոտությանը՝ ABAQUS ՄՕՍ-ում իրականացված ՎՏՍ-ի միջոցով: Վերլուծվել են 20-ից 50 մկմ հաստությամբ թաղանթներ՝ մթնոլորտային ճնշման ազդեցությամբ, երբ հակառակ կողմում վակուում է: Մոդելավորման ընթացքում գնահատվել են համարժեք պլաստիկ դեֆորմացիաները, լարվածությունների բաղադրիչները և  $\gamma$  առանցքով տեղաշարժերը: Արդյունքները ցույց են տվել, որ առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիան առաջանում է թաղանթի կենտրոնական հատվածում, մինչդեռ ամրացման գոտում դիտվում են ավելի փոքր արժեքներ: Տեղաշարժերը մեծանում են դեպի կենտրոն՝ վակուումային կողմի ուղղությամբ: Մտացված բաշխումների հիման վրա որոշվել են կրիտիկական հաստություններ, որոնք կանխում են թաղանթի խզումը և ապահովում են հուսալի մեխանիկական աշխատանք՝ միաժամանակ պահպանելով փնջի օպտիմալ բնութագրերը:

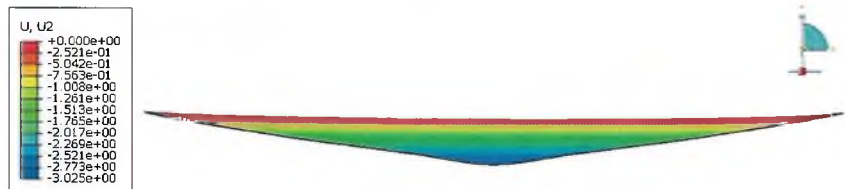
Այ. 3-ում ներկայացված են Y առանցքի նկատմամբ երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթի տեղափոխությունների բաշխման գոտիները ( $u_y = U2$ ):

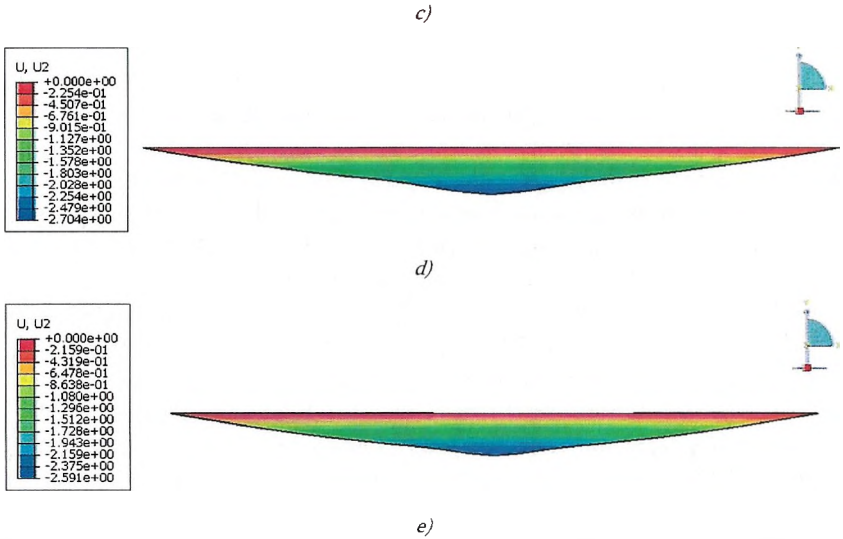


a)



b)





Սկ. 3. Տեղափոխությունը *Y* առանցքի ուղղությամբ, երբ մետաղաթաղնթը ունի 30 մկմ (a), 36 մկմ (b), 40 մկմ (c), 46 մկմ (d) և 50 մկմ (e) հաստություններ

**Երրորդ գլուխ:** Ներկայացվել են հիմնական գործիքակազմը և սարքավորումները, որոնց միջոցով իրականացվել է հետազոտության փորձարարական մասը: Ներկայացվել են սարքավորումների առանցքային բնութագրերը:

Սարքավորումներն են Hexagon Leitz Reference 5.4.3 չափումների մեքենան, տուրբո-մոլեկուլային պոմպ կայանքը և IMG-300 ԳԲՎ ինվերտորային մագնետրոնային սվիչը իր կառավարման բրնկով:

Hexagon Leitz Reference 5.4.3 վերահսկիչ-չափիչ մեքենան նախատեսված է դետալի կամ հանգույցի վերաբերյալ երկրաչափական տեղեկություններ ստանալու համար: Մեքենան թույլ են տալիս իրականացնել տարբեր բարդության սարքերի երկրաչափական բնութագրերի օպերատիվ և գերճշգրիտ չափումներ: Սարքը ունի նաև սքանավորման հնարավորություն:

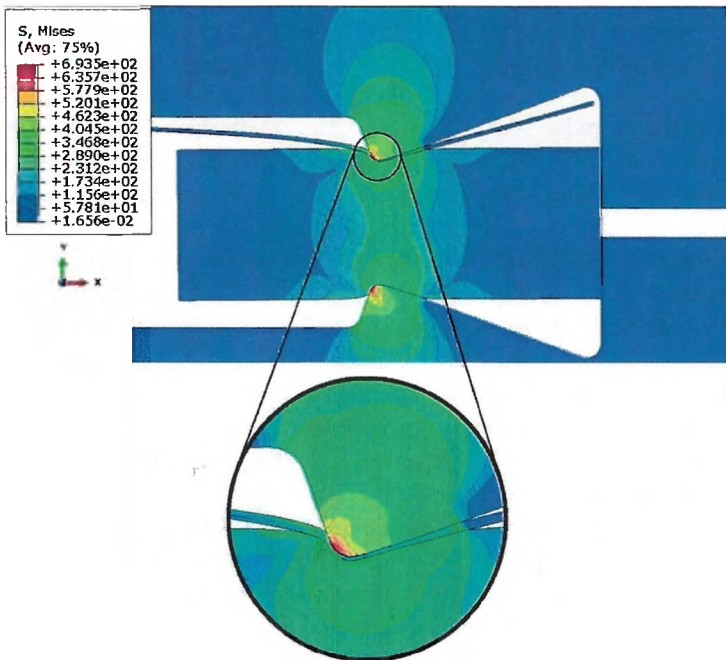
Տուրբոմոլեկուլային պոմպ կայանքը իր գաբարիտներով կոմպակտ պոմպ է, որը թույլ է տալիս ստանալ մինչև  $10^{-9}$  մԲար ճնշում: Կայանքը պատունակում է երկու տիպի՝ չոր մեխանիկական և տուրբոմոլեկուլային պոմպեր, որոնց համադրումը ապահովում է համակարգի՝ մինչև գերբարձր վակուումը:

IMG-300 ԳԲՎ ինվերտորային մագնետրոնային սվիչը սովորաբար չափում է մոտավրապես  $10^{-2}$ -ից մինչև  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  մԲար տիրույթի ճնշում: Սարքի աշխատանքի

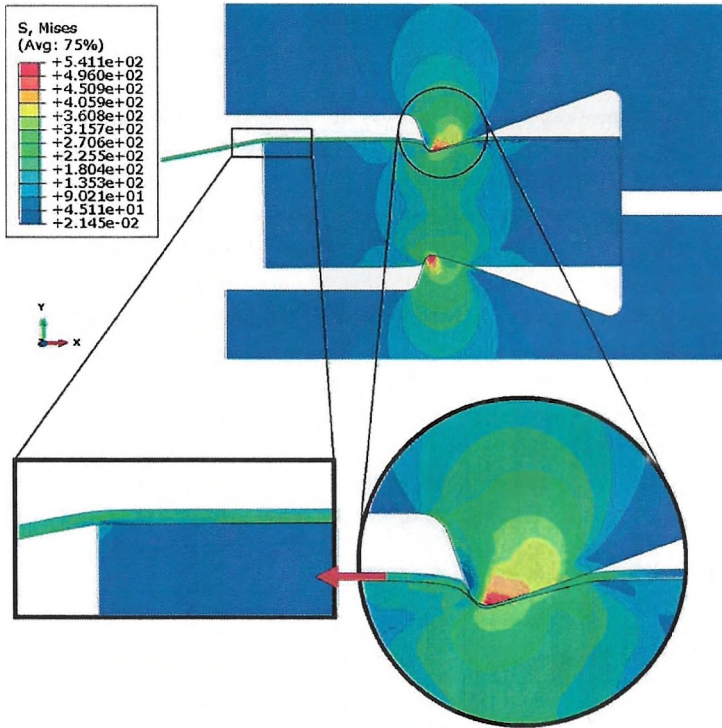
հիմքում ընկած է ինվերտորային մագնետրոնային սվիչի տեխնոլոգիան՝ ասոր կատողի իոնիզացիան:

**Չորրորդ գլուխ:** Հիմք ընդունելով «խտարար օղակից հետո» տեղակայմամբ հանգույցը ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը: Որպես հիմնական դետալներ հանդես են եկել SS 304L չժանգոտվող պողպատից DN35CF մակնիշի երկու կցաշուրթերը, թթվածնագրկված պղնձից փափուկ և ¼ կոշտ խտարար օղակները և երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթը: Փորձերն իրականացվել են SIMULIA 2019 (ABAQUS CAE) ԱՄՄ-ում՝ ներմուծելով բոլոր դետալների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները:

Մոդելավորման առաջին (հերմետիկացման) փուլը իրականացվել է DN35CF կցաշուրթերի սեղմման փորձի հիման վրա՝ կիրառելով A2-70 դասի հեղյուսներ (չոր շփում, տափօղակների օգտագործմամբ): Փափուկ (թրծված) խտարար օղակների դեպքում սեղմման արդյունքում կցաշուրթերի միջև առաջանում է 0.295 մմ թույլատրելի բացվածք, իսկ ¼-կոշտ խտարար օղակների դեպքում՝ 0.344 մմ: Հաշվի առնելով 50 մկմ հաստությամբ մետաղաթաղանթը, համապատասխան բացվածքները կազմում են համապատասխանաբար 0.345 մմ և 0.394 մմ:



ա)



բ)

Նկ. 4. Միզեսի լարումների բաշխվածության գոտիները 1/4 կոշտ խտարար օղակի դեպքում առաջին (ա) և երկրորդ (բ) փուլերում

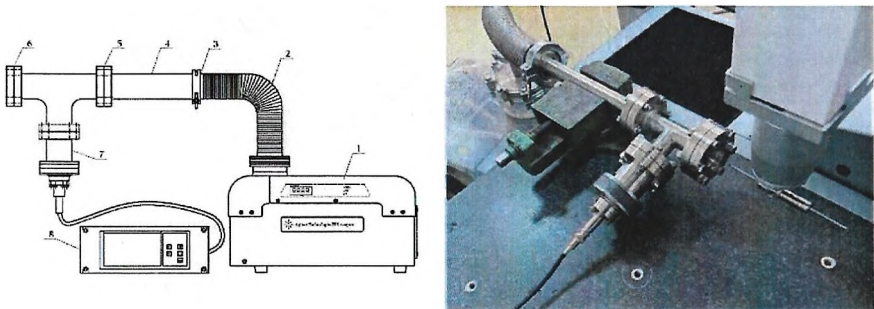
Երկրորդ (պոմպահանման) փուլն իրականացվել է մթնոլորտային ճնշման (մոտավորապես 0,101325 ՄՊա) պայմաններում, որն ազդել է մետաղաթաղանթի մի կողմում, իսկ մյուս կողմում (վակուումի կողմ) ճնշումը ընդունվել է 0 ՄՊա: Դիտարկելով, որ արագացուցչային վակուումային համակարգերում պահանջվում է գերբարձր վակուումի պայմաններ (մոտավորապես  $10^{-10}$  մԲար-վ/վ), դիտարկվել է 0 ՄՊա: Այս երկու փուլերը մոդելավորումների տեսքով ներկայացված է նկ. 4-ում, որտեղ նկ. 4ա-ն հերմետիկացման փուլն է, նկ. 4բ-ն՝ պոմպահանման:

Մոդելավորման ընթացքում պարզվել է, որ կցաշուրթերի սեղմման փուլում հերմետիկացման գոտում Միզեսի լարվածությունները բաշխմամբ և մեծությամբ գրեթե նման են: Սակայն վակուումային պոմպահանումից հետո թաղանթի հերմետիկացման գոտում տեղի է ունենում լարվածությունների էական թուլացում, և

լարվածությունների բաշխումը տարբերվում է «դեֆորմացնող եզր – մետաղաթաղանթ» և «դեֆորմացնող եզր – խտարար օղակ» փոխազդեցության գոտիներում:

Մոելավորումներն իրականացվել են տարբեր կլորացման շառավղեր ( $r_1=0$  մմ,  $r_2=0.25$  մմ,  $r_3=0.5$  մմ,  $r_4=0.75$  մմ,  $r_5=1$  մմ,  $r_6=1.5$  մմ և  $r_7=2$  մմ) ունեցող խտարար օղակների դեպքում: Պարզվել է, որ Միգեսի լարվածությունների բաշխման պատկերը ընդհանուր առմամբ նման է բոլոր դեպքերում: Սակայն հայտնաբերվել է շառավղերի միջակայք  $r = r_a - r_b$ , որտեղ  $0 < r_a \leq 0.25$  մմ և  $0.5$  մմ  $\leq r_b < 0.75$  մմ, որի դեպքում տեղի է ունենում մետաղաթաղանթի խզում: Այդ միջակայքում շփման ( $f$ ) և շփման մակերեսի ( $S$ ) հավասարակշռությունը, ինչպես նաև դեֆորմացիայի սկզբնական փոքր տրամագիծը սահմանափակում են մետաղաթաղանթի ազատ ծռումը և միաժամանակ մեծացնում են շառավղային ձգումը մինչև կրիտիկական մակարդակ՝ հանգեցնելով խզման: Ուսումնասիրվել են նաև թաղանթի լարվածությունները խզման գործընթացում:

Փորձերն իրականացվել են հինք անգամ, պարզ ստենդի միջոցով, որը ներկայացված է նկ. 5-ում: Որպես ելակետային կլորացման շառավղի ընտրվել է  $r_1=0$  մմ-ը:



Նկ. 5. Փորձարարական ստենդի սխեմատիկ և ռեալ տեսքը

Փորձարարական արդյունքները, ստացված չափումների մեքենայի սկանավորմամբ, ցույց են տվել, որ նույնիսկ տասը պոմպահանման ցիկլերից հետո թաղանթի պրոֆիլում էական շեղումներ չեն արձանագրվել. առավելագույն տարբերությունը կազմել է ընդամենը 3 մկմ: Այս կայունությունը հաստատում է թաղանթի ամրությունն ու հուսալիությունը: Թաղանթի կենտրոնական միջին տեղաշարժը կազմել է մոտավորապես  $0.9859 \pm 0.0002$  մմ:

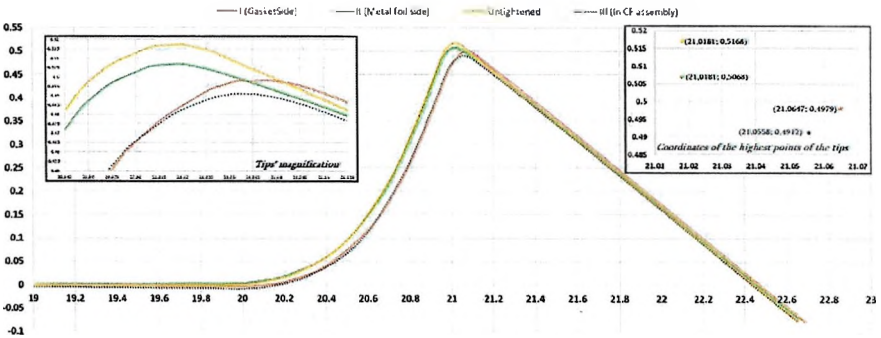
Բացի այդ, մոդելավորման և փորձարարական արդյունքների համեմատության հիման վրա որոշվել է, որ շփման գործակիցները պետք է գտնվեն  $0.48 < f < 0.6$  միջակայքում «մետաղաթաղանթ – դեֆորմացնող եզր» (Ti Gr 2 և SS 304L)

զույգի համար և  $0.62 < f < 0.8$  միջակայքում «մետաղաթաղանթ – խտարար օղակ» (Ti Gr 2 և OFHC պղինձ) զույգի համար:

Աղ. 1. Կցաշուրթերի մակերևույթների չափված երկրաչափական բնութագրերը

Կցաշուրթի տեսակը		Ներքին մակերևույթ			
		Շեղումը հարթությունից (մմ)	Գլանական մակերևույթ		
		Տրամագիծ (մմ)	Չևը (մմ)		
Չձգված		0.0009	48.3108	0.0016	
I	Արտանցման պատուհանի հանգույց	Խտարար օղակի կողմ	0.0203	48.4018	0.0099
II	Մետաղաթաղանթի կողմ	0.0028	30.1574	0.0006	
III	CF հանգույց	0.0153	23.9050	0.0047	

Օգտագործված կցաշուրթերը նոր նշանակմամբ իրենց մակերևույթների բնութագրերով ներկայացված են աղ. 1-ում, իսկ դեֆորմացնող եզրերի սքանավորումները ներկայացված են նկ. 6-ում:



Նկ. 6. Դեֆորմացնող եզրի սքանավորումները I, II, III և չձգված կցաշուրթերի դեպքում

Ուսումնասիրվել է նաև «խտարար օղակից առաջ» տեղակայմամբ հանգույցը, որի դեպքում մշակվել են հինգ երկրաչափություններ կցաշուրթի այն գոտու համար, որտեղ հենվում է մետաղաթաղանթը: Վերջավոր տարրերի մոդելավորումները ցույց են տվել, որ ստանդարտ CF կցաշուրթերի երկրաչափությունների կիրառումը հանգեցնում է տիտանե թաղանթի խզման, ընդ որում խզումը սկսվում է վակուումի կողմից: Այս խնդիրը լուծելու նպատակով մշակվել և վերլուծվել են վակուումային կողմի կցաշուրթերի մի շարք փոփոխված երկրաչափություններ: Ուսումնասիրված տարբերակներից G3 (Նկ. 7) երկրաչափությունը կրորացված դանակային եզրով և

առանց հենման գոտու, ցուցաբերել է առավել նպաստավոր լարվածությունների բաշխում: Այդ երկրաչափությունը զգալիորեն նվազեցրել է Միզեսի լարումները դեֆորմացնող եզրի շրջանում՝ համեմատած ստանդարտ կցաշուրթերի հետ, սահմանափակել է կցաշուրթի պլաստիկ դեֆորմացիան և նվազեցրել է թաղանթի կենտրոնական տեղաշարժը:

## Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

1. Г.А. Исунц // Выходные окна в ускорительной технологии / Вестник НПУА Механика, Машиноведение, Машиностроение, 2024, 1, 9-28.
2. H. Isunts, A. Davtyan, V. Avagyan // Overview of accelerator output windows, their parts and preferred materials / Journal of Instrumentation, 2025, 20 (09), T09002.
3. H. ISUNTS, A. DAVTYAN, V. AVAGYAN // Deformed state's simulation of the first-grade titanium foil of the accelerator output window / Proceedings of the RA NAS and NPUA, 2023, 76, 269-278.
4. H. Isunts, V. Avagyan, A. Azizov, A. Grigoryan, A. Vardanyan, A. Davtyan // Stress-strain state analysis of the first-grade titanium foil of the accelerator output window in a static state / 15th International Particle Accelerator Conference (IPAC'24), 2024, 1538-1541.
5. H. Isunts, A. Davtyan, V. Yepremyan, A. Hovhannisyan, A. Grigoryan, A. Vardanyan, V. Avagyan // The analysis and experimental research of the output windows with foil above-gasket positioning in accelerator technology / Vacuum, 2025, 243, 114830.

## Hamlet Isunts

### Development of a new technology for manufacturing particle beam output windows in accelerator technology

#### SUMMARY

This work presents a comprehensive and systematic investigation of titanium foil accelerator output windows and their implementation in ConFlat (CF) flange assemblies, combining advanced finite element modeling with targeted experimental validation. The primary focus of the research was to understand the stress-strain state, deformation behavior, and sealing performance of first and second-grade titanium foils subjected to mechanical loading during flange tightening and vacuum pumping, as well as to identify design parameters that ensure reliable long-term operation in accelerator and ultra-high-vacuum (UHV) systems.

The sealing behavior of titanium foils in CF flange assemblies was investigated using a combined experimental-numerical approach that accounted for flange tightening, vacuum pumping, and frictional interactions. The results demonstrated that although stress distributions during flange tightening are relatively similar across the sealing zone, vacuum pumping leads to substantial stress relaxation and redistribution, particularly in the regions of contact between the knife edge, foil, and gasket.

Experimental measurements, including high-precision coordinate measurements of flange flatness and foil deflection profiles, confirmed the validity of the numerical models. The results showed excellent repeatability and stability of the foil deformation behavior, even after multiple vacuum pumping cycles, thereby demonstrating the mechanical durability and reliability of the proposed designs. The comparison between simulations and experiments also enabled the identification of realistic friction coefficient ranges for the relevant material pairs, improving the accuracy and predictive capability of the numerical models.

Overall, the results obtained in this dissertation establish a solid scientific and engineering basis for the design of titanium foil accelerator output windows and CF flange assemblies. The findings offer practical design guidelines and validated modeling approaches that can be directly applied to future upgrades of the AREAL linear accelerator and extended to similar accelerator and vacuum systems at other research facilities.

Разработка новой технологии изготовления выходных окон пучка частиц в ускорительной технике

РЕЗЮМЕ

В работе представлено всестороннее и систематическое исследование ускорительных выходных окон с титановыми фольгами и их применения в узлах с фланцами типа ConFlat (CF) с использованием современных методов конечных элементов и целенаправленной экспериментальной валидации. Основное внимание уделено изучению напряжённо-деформированного состояния, деформационного поведения и герметизирующих свойств титановых фольг 1-го и 2-го классов при механических нагрузках, возникающих при затяжке фланцев и вакуумной откачке, а также определению конструктивных параметров, обеспечивающих надёжную и долговременную эксплуатацию в ускорительных и сверхвысоковакуумных системах.

Герметизирующее поведение титановых фольг в узлах с CF-фланцами исследовано с использованием комбинированного экспериментально-численного подхода с учётом затяжки фланцев, вакуумной откачки и трения в контактных зонах. Показано, что хотя распределение напряжений в зоне герметизации при затяжке фланцев является относительно схожим, вакуумная откачка приводит к существенной релаксации и перераспределению напряжений, особенно в областях контакта «режущая кромка – фольга» и «режущая кромка – уплотнительное кольцо».

Экспериментальные измерения, включая высокоточные координатные измерения плоскостности фланцев и профилей прогиба фольги, подтвердили достоверность численных моделей. Результаты продемонстрировали высокую воспроизводимость и стабильность деформационного поведения фольги даже после многократных циклов вакуумной откачки, что свидетельствует о механической прочности и надёжности предложенных конструкций. Сравнение расчётных и экспериментальных данных позволило определить реалистичные диапазоны коэффициентов трения для соответствующих пар материалов, повысив точность и прогностические возможности численных моделей.

В целом полученные в диссертации результаты формируют прочную научную и инженерную основу для проектирования ускорительных выходных окон с титановыми фольгами и CF-фланцевых узлов. Представленные выводы и методики могут быть непосредственно использованы при модернизации линейного ускорителя AREAL, а также применены в аналогичных ускорительных и вакуумных системах других научно-исследовательских центров.

