

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

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 72

N 1

ՀՈՒՆՎԱՐ – ՄԱՐՏ

ԵՐԵՎԱՆ 2019

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 72

N 1

ЯНВАРЬ – МАРТ

ЕРЕВАН 2019

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 72

N 1

JENUARY - MARCH

YEREVAN 2019

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵԳԻԱ

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Գրիգորյան Ա.Խ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պատասխանատու քարտուղար՝ Մեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ
Խմբագրական կոլեգիա՝
Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ն.Պ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ս.Ք., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գագարինսկի Ա.Յու., ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Գոնելյան Ս., տ.գ.թ., Եգիպտոս
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի
Դավթյան Ս.Պ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ք.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա
Զորյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Լան Չ., տ.գ.թ., Չինաստան
Կարայան Հ.Ս., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա
Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ
Հահանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,
Ուկրաինա
Ղուլյան Ա.Գ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Մանդալիկա Ս., տ.գ.թ., Հնդկաստան
Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ
Միխայլենիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Շիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան
Չապլիզին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Սապատնեկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Սարգսյան Յու.Լ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Մքիտեն Ս.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Միմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ստենպլովսկի Ա.Լ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Վորոբյով Ա.Ե., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Տիխոմիրով Գ.Վ., ֆ.-մ.գ.դ., ՌԴ
Ցանովա Ս., տ.գ.թ., Բուլղարիա
Ուբար Ռ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Քուչուկյան Ա.Թ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Заместитель главного редактора Григорян А.Х., д.т.н., проф., Армения

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

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

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

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

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

Бадалян Н.П., д.т.н., проф., Россия

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

Гагаринский А.Ю., д.ф.-м.н., проф., Россия

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

Гулян А.Г., академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Давтян С.П., член-корр. НАН РА, д.х.н., проф., Армения

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

Зорян Е., к.т.н., США

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

Караян Г.С., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

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

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Кучукян А.Т., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.Э., к.т.н., проф., Армения

Михайлевич А.А., д.т.н., проф., Беларусь

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

Саркисян Ю.Л., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Сбитнев С.А., д.т.н., проф., Россия

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

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

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия

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

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

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

Цанова С., к.т.н., Болгария

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

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

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Deputy Editor-in-Chief: Grigoryan A.Kh., Sci.Dr., Prof., Armenia

Executive Secretary: Seyranyan Zh.S., Armenia

Editorial Board:

Aghbalyan S.G., Sci.Dr., Prof., Armenia

Aslanyan L.H., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Badalyan N.P., Sci.Dr., Prof., Russia

Baghdasaryan H.V., Sci.Dr., Prof., Armenia

Baghdasaryan M.Q., Sci.Dr., Prof., Armenia

Chang F., Member of National Academy of Taiwan, Sci.Dr., Taiwan

Chaplygin Yu.A., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Courtois B., Ph.D., France

Davtyan S.P., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Dokic B., Sci.Dr., Bosnia and Herzegovina

Gagarinski A.Yu., Sci.Dr., Prof., Russia

Ghoneima M., Ph.Dr., Egypt

Ghulyan A.G., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Grimblatt V., Ph.Dr., Chile

Hahanov V.I., Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine

Hakhumyan A.A., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Hakobyan V.N., Sci.Dr., Armenia

Ilyushenko A.F., Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus

Karayan H.S., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Krasnikov G.Y., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Kuchukyan A.T., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Lan Ch., Ph.Dr., China

Mandalika S., Ph.Dr., India

Marukhyan V.Z., Ph.Dr., Prof., Armenia

Mikhaylevich A.A., Sci.Dr., Prof., Belarus

Petrosyan O.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Petrosyants K.O., Sci.Dr., Prof., Russia

Sapatnekar S., Ph.Dr., USA

Sargsyan Yu.L., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Sbitnev S.A., Sci.Dr., Prof., Russia

Schlichtmann U., Ph.Dr., Germany

Simonyan S.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Stempkovski A.L., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Tikhomirov G.V., Sci.Dr., Russia

Tsanova S., Sci.Dr., Bulgaria

Ubar R., Academician of Academy of Sciences of Estonia, Sci.Dr., Prof., Estonia

Usanov V.I., Sci.Dr., Prof., Russia

Vorobyov A.Y., Sci.Dr., Prof., Russia

Zorian Y., Ph.Dr., USA

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2019

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ.Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Գ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԲԱԲԱՅԱՆ
ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԽՈՂՈՎԱԿԻ ԿՈՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՄԱՅՐՈՒՄ
ԿՈՐՁԱՆՄԱՆ ԳՈՐԾՐԱԹՅՈՒՆԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Պարզեցված մեթոդով ուսումնասիրվել է եռակալված տարբեր նյութերից բարակապատ խողովակների կոնական մամլամայրում կորզանման գործընթացի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը շփման բացակայության և առկայության դեպքերում: Կիրառվել է մեթոդ, ըստ որի օգտագործվում են դրանց տարբեր ծակոտկենությունների դեպքերում հոսունության սահմանների լարումները, որոնք ֆունկցիա են հիմնանյութի հոսունության սահմանի լարումից ու նյութի ծակոտկենությունից:

Առաջարկվում է խողովակի դեֆորմացման աստիճանը որոշել ոչ միայն ε_i դեֆորմացիաների ինտենսիվությամբ, այլ նաև ε_{eq} դեֆորմացիաների համարժեքայինով, որի համար ստացվել է լարվածային վիճակի բաղադրիչները հաշվի առնող բանաձև: Ծակոտկենության բացակայության և առկայության դեպքերում կատարված հաշվարկները ցույց են տալիս, որ փոքր դեֆորմացիաների դեպքերում դրանց արժեքները, մինչև 50% պլաստիկ դեֆորմացիան, բավականին մոտ են մեկը մյուսին, ինչը նշանակում է, որ այդ դեպքերում նյութի ընթացիկ ծակոտկենությունը որոշող բանաձևում կարելի է օգտագործել հոծ նյութերի համար կիրառվող ավելի պարզ ε_i տվյալները: Թվային հաշվարկները կատարվել են MS EXEL ծրագրային միջավայրում 14° կոնականությամբ մամլամայրում բարակապատ խողովակների կորզանման դեպքում:

Առանցքային բառեր. բարակապատ խողովակ, կորզանում, եռակալված նյութ, ծակոտկենություն, հիմնանյութ, չափագուրկ լարումներ, փոքր դեֆորմացիաներ:

Խողովակի դեֆորմացիան առանցքասիմետրիկ է: Այդ պատճառով լարումները, դեֆորմացիաները և պատի հաստությունը կախված են միայն շառավղից: Պտտման թաղանթի առանցքասիմետրիկ անմոմենտ բեռնավորման ժամանակ թաղանթի բոլոր կետերի լարվածային վիճակը հարթ է, իսկ σ_m միջօրեականային և σ_{θ} շրջանային լարումները գլխավոր լարումներ են: Առանցքասիմետրիկ բեռնված պտտման թաղանթից գլխավոր հատույթներով կտրված տարրի հավասարակշռության հավասարումներն ունեն հետևյալ տեսքը [1-4].

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r h) - \sigma_t h + \frac{p_m r}{\sin \alpha} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_{\theta}}{\rho_{\theta}} = -\frac{p_v}{h}, \quad (2)$$

որտեղ ρ_m -ը թաղանթի միջօրեական հաստության կորության շառավիղն է, ρ_{θ} -ն՝ միջօրեական աղեղին ուղղահայաց կոնական մակերևույթով հատված թաղանթի

կորության շառավիղը, r - ը՝ թաղանթի առանցքին տարված ուղղահայաց հաստությամբ շրջանագծի շառավիղը, h - ը՝ թաղանթի պատի հաստությունը, p_m - ը և p_v - ն՝ միջօրեականի և նորմալի ուղղություններով բաշխված բեռնվածքի ինտենսիվությունները, α - ն՝ մամլամայրի կոնականության անկյունը:

Կոնական մամլամայրում գլանական խողովակի դեֆորմացման դեպքում՝

$$\rho_m = \infty, \rho_\theta = r / \cos \alpha ::$$

Մասնավոր դեպքում՝ հոծ նյութերից խողովակի կոնական մամլամայրում կորզանման խնդրի լուծման համար օգտագործվում է նաև հետևյալ մոտարկված Միգելսի պլաստիկության պայմանը (ՊՊ) [2]՝

$$\sigma_m - \sigma_\theta = m \sigma_h, \quad (3)$$

որտեղ m - ը Լոդեի գործակիցն է, σ_h - ը՝ նյութի հոսունության սահմանի լարումը, իսկ σ_m և σ_θ - ը՝ գլխավոր լարումները՝ $\sigma_1 = \sigma_m$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$: Այդ դեպքում (1) և (2) հավասարումների լուծումը նեկայացվում է հետևյալ տեսքով [1-4]՝

$$d\sigma_m / [\sigma_m \mu \tan \alpha - m \sigma_h (1 + \mu \tan \alpha)] = dr / r, \quad (4)$$

որի ինտեգրումից հետո խողովակի կոնական մամլամայրում կորզանման դեպքում $\bar{\sigma}_m$ չափագուրկ միջօրեականի լարման որոշման համար ստացվում է հետևյալ բանաձևը՝

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{m \sigma_h} = \left(1 + \frac{1}{\mu \tan \alpha}\right) \left\{1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\mu \tan \alpha}\right\}, \quad (5)$$

որտեղ r_0 - ն մամլամայրի մուտքի մոտ խողովակի միջին շառավիղն է:

Շփման բացակայության դեպքում (5) - ից ստացվում է [2]՝

$$\bar{\sigma}_m = m \ln r_0 / r: \quad (6)$$

Ինչ վերաբերում է չափագուրկ շրջանային լարման որոշմանը, ապա դրա համար օգտագործվում է (3) բանաձևը՝

$$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_m - 1, \quad (7)$$

որտեղ $\bar{\sigma}_m = \sigma_m / m \sigma_h$, $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / m \sigma_h$ և դրանց հիման վրա որոշվող գործնական կարևոր նշանակություն ունեցող տարբեր նյութերի σ_m և σ_θ իրական լարումների արժեքներն են.

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m m \sigma_h \text{ և } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta m \sigma_h: \quad (8)$$

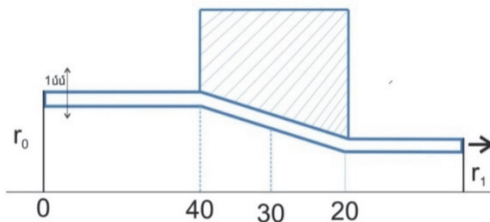
Եռակալված նյութերից խողովակների պլաստիկ դեֆորմացման վերաբերյալ գիտական աշխատանքների վերլուծությունը [4,5] ցույց տվեց, որ կոնական

մամլամայրերում և կալակների վրա եռակալված գլանական բարակապատ խողովակների դեֆորմացման տեսական հետազոտությունները հիմնված են ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության հոսունության տեսության (ՄՆՊՀՏ) հավասարումների [4] վրա: Սակայն այդ հետազոտությունները բարդ են և դժվար կիրառելի: Հետևաբար, այդ բնագավառում կատարվող աշխատանքների պարզեցումը բավականին արդիական է:

Աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել պարզեցված մեթոդով տարբեր եռակալված նյութերից խողովակների կոնական մամլամայրում կորզանման գործընթացի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը շփման առկայության և բացակայության դեպքերում:

Օգտագործելով (6) և (7) բանաձևերը դեֆորմացվող խողովակի r շառավղի տարբեր արժեքների համար՝ որոշենք $\bar{\sigma}_m$ - ը և $\bar{\sigma}_\theta$ - ն, երբ $m_1 = 1.1$, $r_1 = 20$ մմ և $r_0 = 40$ մմ (նկ. 1): Այդ 1-ում բերված են $\bar{\sigma}_m$ - ի և $\bar{\sigma}_\theta$ - ի հաշվարկային չափագուրկ, ինչպես նաև հիմնական $\mathcal{E}_\theta = \ln(r/r_0)$ շրջանային դեֆորմացիայի ու ε_i դեֆորմացիաների ինտենսիվության տվյալները: Ընդ որում, ընդունելով գլխավոր դեֆորմացիայի արժեքները՝ $\varepsilon_1 = \varepsilon_m = -\varepsilon_\theta$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_v = 0$ և $\varepsilon_3 = \varepsilon_\theta$ - ի (որտեղ $\mathcal{E}_m$ - ը և $\mathcal{E}_v$ - ն խողովակի միջօրեական և մակերևույթի նորմալի ուղղություններով լուգարիթմական դեֆորմացիաներն են), ε_i - ն որոշվել է հետևյալ բանաձևով [1,4].

$$\varepsilon_i = \left(\sqrt{2/3} \right) \sqrt{(\varepsilon_m - \varepsilon_v)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_m)^2} = \left(2/\sqrt{3} \right) |\varepsilon_\theta| = (1.155) \ln(r_0/r): \quad (9)$$



Նկ. 1. Խողովակի կորզանման հաշվարկային սխեման

Աղյուսակ 1

$\bar{\sigma}_m$ - ի, $\bar{\sigma}_\theta$ - ի, ε_θ - ի և ε_i - ի արժեքները տարբեր r - երի դեպքում

r , մմ	$\frac{r_0}{r}$	$\bar{\sigma}_m = \ln \frac{r_0}{r}$	$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_m - 1$	$\varepsilon_\theta = \ln(r/r_0)$	ε_i
40	1	0	-1	0	0
35	1,14	0,134	-0,866	-0,134	0,154
30	1,33	0,288	-0,712	-0,288	0,333
25	1,60	0,470	-0,530	-0,470	0,543
20	2	0,693	-0,307	-0,693	0,800

Եռակալված խողովակի կոնական մամլամայրում պլաստիկ դեֆորմացման գործընթացների պարզեցված մեթոդով հետազոտման համար [6,7] կիրառենք ծակոտկեն չամրացվող նյութից լայն շերտի հարթ դեֆորմացիայի պայմաններում մաքուր պլաստիկ ծոման մեթոդը [7]: Ընդ որում, շառավղային և շրջանային լարումների որոշման համար եռակալված նյութի ՊՊ ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացման տեսություն (ՄՆՊՂՏ) [7] հիման վրա ներկայացվում է հետևյալ տեսքով՝

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + \alpha_0^m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2} = \beta^{n+0.5} \sigma_h, \quad (10)$$

որտեղ $\alpha_0 = \nu_0$ - ն, $\beta = 1 - \nu$ - ն, m -ը և n -ը՝ ծակոտկենության ֆունկցիաները և պարամետրերն են, ν -ն և ν_0 -ն՝ նյութի ընթացիկ ու սկզբնական ծակոտկենությունները: [7]-ում (10)-ի համաձայն՝ եռակալված նյութի տարբեր ծակոտկենությունների դեպքերում հոսունության սահմանի σ_{hv} լարումներն արտահայտվում են ծակոտկեն նյութի հիմնանյութի հոսունության սահմանի σ_h լարումով և ծակոտկենության $\beta^{n+0.5}$ ֆունկցիայով: Դրանք որոշվում են հետևյալ բանաձևով [4,6,7]՝

$$\sigma_{hv} = \sigma_h \cdot \beta^{n+0.5}. \quad (11)$$

Հետևաբար, եռակալված խողովակների դեպքում (8) – ի փոխարեն անհրաժեշտ կլինի օգտագործել հետևյալ բանաձևերը՝

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m \beta^{n+0.5} m_1 \sigma_h \text{ և } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta \beta^{n+0.5} m_1 \sigma_h : \quad (12)$$

Ինչ վերաբերում է խողովակի նյութի սկզբնական ծակոտկենության փոփոխման արժեքների որոշմանը, ապա անհրաժեշտ կլինի օգտագործել նաև ՄՆՊՂՏ հետևյալ հավասարումները՝

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varepsilon_{eq}}{2\beta^{3n}\sigma_{eq}} [2\sigma_\theta - \sigma_m + 2\alpha^m (\sigma_\theta + \sigma_m)], \quad (13)$$

$$\nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp\left(-\frac{9\alpha_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq}}{\beta^{3n} \sigma_{eq}}\right), \quad (14)$$

որտեղ $\sigma_0 = (\sigma_m + \sigma_\theta)/3$ – ն միջին լարումն է, ε_{eq} - ը և σ_{eq} - ը՝ համարժեքային դեֆորմացիան և լարումը: Օգտագործելով (13) – ը, կստանանք՝

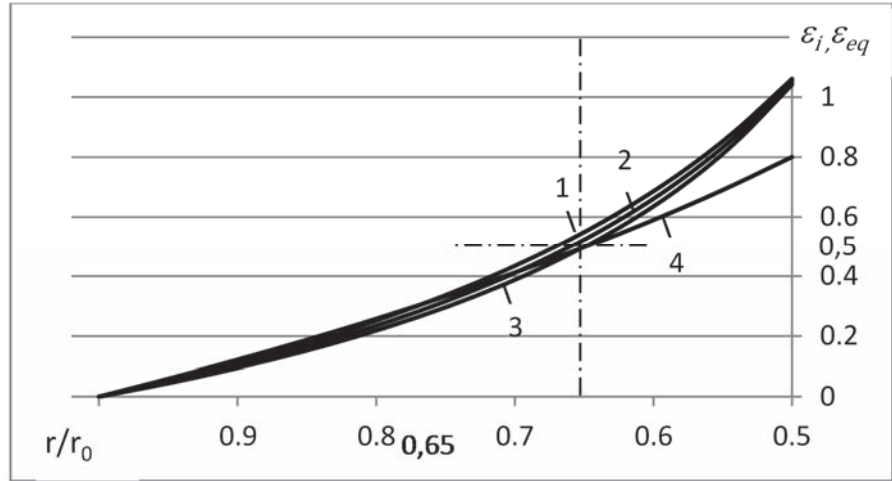
$$\varepsilon_{eq} = \frac{2\beta^{3n}\sigma_{eq}\varepsilon_\theta}{3[\sigma_\theta - (1 - 2\nu_0^m)\sigma_0]} : \quad (15)$$

Գործնական կարևոր նշանակություն ունի խողովակի դեֆորմացման տարբեր աստիճաններում ε_{eq} - ի արժեքների որոշումը նյութի տարբեր ծակոտկենությունների դեպքում: Աղ. 2 – ում և նկ. 2 – ում բերված են ε_{eq} - ի (15) բանաձևով կատարված հաշվարկային տվյալները ծակոտկենության բացակայության ($v=0$) և առկայության ($v=0.05$ և $v=0.1$) դեպքերում, ինչի իրազորման համար օգտագործվել են նաև (6), (7) և (12) բանաձևերով կատարված հաշվարկային տվյալները (աղ. 1): Աղ. 2-ում և նկ. 2-ում բերված են նաև (9) բանաձևով որոշվող ε_i դեֆորմացիաների ինտենսիվության տվյալները: Դրանց համեմատությունը ցույց է տալիս, որ փոքր դեֆորմացիաների դեպքում ε_i - ի և ε_{eq} - ի արժեքները բավականին մոտ են մեկը մյուսին: Հետևաբար, առաջանում է անհրաժեշտություն՝ գնահատելու դրանց մեծությունները:

Աղյուսակ 2

Խողովակի դեֆորմացման տարբեր աստիճաններում ε_i և ε_{eq} տվյալները

r/r_0	ε_i	$\varepsilon_{eq}(v=0)$	$\varepsilon_{eq}(v=0.05)$	$\varepsilon_{eq}(v=0.1)$
1	0	0	0	0
0,95	0,059	0,053	0,048	0,045
0,90	0,122	0,111	0,103	0,095
0,85	0,188	0,177	0,164	0,152
0,80	0,258	0,251	0,234	0,218
0,75	0,332	0,336	0,316	0,296
0,70	0,412	0,434	0,411	0,388
0,65	0,497	0,549	0,524	0,499
0,60	0,59	0,686	0,661	0,636
0,55	0,69	0,853	0,832	0,811
0,50	0,8	1,061	1,052	1,042



Նկ. 2. ε_i և ε_{eq} գրաֆիկները խողովակի դեֆորմացման տարբեր աստիճաններում, երբ փոքր դեֆորմացիաները գտնվում են $r/r_0 = 0,65$ - ի ձախ մասում

Աղ. 3-ում և 4-ում բերված են (9) և (15) բանաձևերով հաշված $\mathcal{E}_i$ -ի և $\mathcal{E}_{eq}$ -ի արժեքները (դրանք համապատասխանաբար նշանակված են a, b, c և d տառերով) շփման բացակայության և առկայության դեպքերում, ինչպես նաև դրանց բացարձակ և տոկոսային տարբերությունները:

Աղ. 2-4 – ի և նկ. 2 – ի տվյալները ցույց են տալիս.

1. a = $\mathcal{E}_i$ -ի և b = $\mathcal{E}_{eq}$ -ի արժեքները մինչև $r/r_0 \approx 0.65$, այսինքն՝ $\varepsilon_i = \varepsilon_{eq} \approx 0.5$ պլաստիկ դեֆորմացիան, բավականին մոտ են մեկը մյուսին, ինչը նշանակում է, որ փոքր դեֆորմացիաների դեպքում (14) բանաձևում $\mathcal{E}_{eq}$ - ի փոխարեն կարելի է օգտագործել $\mathcal{E}_i$ - դեֆորմացիաների ինտենսիվության արժեքը,

2. b, c և d – ի մեծությունների փոքր տարբերությունը բացատրվում է այդ դեպքերում նյութի տարբեր սկզբնական ծակոտկենությունների հաշվառմամբ:

Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության ծակոտկենության որոշման (14) բանաձևը, երբ $\alpha_0 = \nu_0$, $\beta = 1 - \nu_0$ գրենք հետևյալ տեսքով՝

$$\nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp \left(- \frac{9 \nu_0^m \sigma_0 \mathcal{E}_{eq}}{(1 - \nu_0)^{3n} \sigma_{eq}} \right) : \quad (16)$$

$\mathcal{E}_i$ - ի և $\mathcal{E}_{eq}$ - ի արժեքները շփման բացակայության դեպքում

r/r ₀	f = 0, α = 14°									
	a = ε _i	b = ε _{eq} v=0	c = ε _{eq} v=0.05	d = ε _{eq} v=0.1	b-a	%	c-b	%	d-c	%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,875	0,154	0,143	0,132	0,123	-0,011	7,1	-0,011	7,4	-0,010	7,5
0,750	0,332	0,336	0,316	0,296	0,004	1,2	-0,021	6,1	-0,020	6,2
0,625	0,543	0,614	0,589	0,563	0,072	13,2	-0,025	4,1	-0,026	4,3
0,500	0,800	1,061	1,052	1,042	0,260	32,5	-0,009	0,8	-0,010	1,0

$\mathcal{E}_i$ - ի և $\mathcal{E}_{eq}$ - ի արժեքները շփման առկայության դեպքում

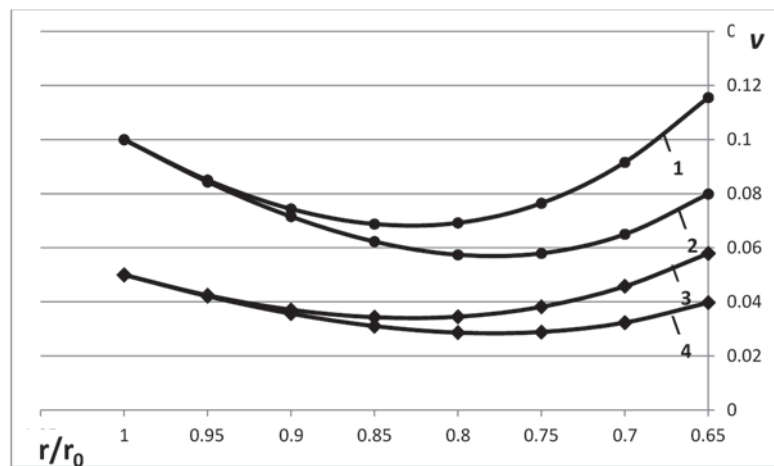
r/r ₀	f = 0.1, α = 14°									
	a = ε _i	b = ε _{eq} v=0	c = ε _{eq} v=0.05	d = ε _{eq} v=0.1	b-a	%	c-b	%	d-c	%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,875	0,154	0,147	0,137	0,127	-0,007	4,7	-0,010	7,0	-0,010	7,1
0,750	0,332	0,355	0,337	0,319	0,023	6,9	-0,018	5,2	-0,018	5,4
0,625	0,543	0,671	0,655	0,639	0,129	23,7	-0,016	2,4	-0,017	2,6
0,500	0,800	1,203	1,232	1,264	0,402	50,3	0,029	2,4	0,032	2,6

(16) բանաձևով թվային հաշվարկներ կատարելու համար անհրաժեշտ է ունենալ միջին լարման՝ $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, լարումների և դեֆորմացիաների համարժեքայինների արժեքները: Ընդունենք, որ նյութը չամրացող է, այսինքն՝ $\sigma_{eq} = \sigma_{hv}$, և դեֆորմացիաների համարժեքայինը փոխարինում ենք դեֆորմացիաների ինտենսիվությամբ՝ $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_i$: Թվային հաշվարկները կատարվել են $a = \mu * ctg\alpha$ պարամետրի 0 և 0.4 արժեքների համար բարակապատ խողովակների նյութի սկզբնական ծակոտկենության 5% և 10% - ի դեպքերում:

Օգտագործվել է MS EXCEL ծրագրային միջավայրը: Աղ. 5 - ում բերված են բարակապատ խողովակների չափագուրկ σ_1/mY , σ_θ/mY , σ_ϕ/mY լարումների, ինչպես նաև ε_θ - ի, ε_i - ի և v - ի r/r_0 հարաբերությունից կախված փոփոխության արժեքները, երբ տրված են դրանց շփման բացակայության ($f = 0$) և առկայության ($f = 0.1$) դեպքերում կորզանման տեխնոլոգիական գործընթացի հետևյալ պարամետրերի մեծությունները՝ $m=1, n=0.25$ և $\alpha=14^\circ$: Նկ. 3 - ում ցույց են տրված բարակապատ խողովակների նյութի v ծակոտկենության փոփոխության գրաֆիկները՝ r/r_0 - ից կախված նյութի 5 և 10% սկզբնական ծակոտկենությունների դեպքերում:

Եռակալված բարակապատ խողովակների կոնական մամլամայրում
կորզանման դեպքում լարվածադեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչները, երբ $\nu_0 = 5$ և 10%

r/r_0	ε_θ	ε_i	$f = 0, \alpha = 14^\circ$					$f = 0.1, \alpha = 14^\circ$				
			$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_\theta$	$\bar{\sigma}_0$	$\nu_{0.1}$	$\nu_{0.05}$	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_\theta$	$\bar{\sigma}_0$	ν	ν
1	0	0	0	-1	-0,33	0,1	0,050	0	-1	-0,33	0,1	0,050
0,95	-0,051	0,059	0,05	-0,95	-0,30	0,084	0,042	0,07	-0,93	-0,29	0,085	0,042
0,90	-0,105	0,122	0,11	-0,89	-0,26	0,072	0,036	0,14	-0,86	-0,24	0,074	0,037
0,85	-0,163	0,188	0,16	-0,84	-0,23	0,062	0,031	0,22	-0,78	-0,19	0,069	0,034
0,80	-0,223	0,258	0,22	-0,78	-0,18	0,057	0,029	0,30	-0,70	-0,13	0,069	0,035
0,75	-0,288	0,332	0,29	-0,71	-0,14	0,058	0,029	0,38	-0,62	-0,08	0,076	0,038
0,70	-0,357	0,412	0,36	-0,64	-0,10	0,065	0,032	0,47	-0,54	-0,02	0,092	0,046
0,65	-0,431	0,497	0,43	-0,57	-0,05	0,080	0,040	0,55	-0,45	0,04	0,116	0,058



Նկ. 3. Խողովակների նյութի սկզբնական $\nu_0 = 5$ և 10% ծակոտկենությունների
փոփոխությունների գրաֆիկները r/r_0 - ից կախված՝ $f = 0$ (1 և 3 կորերը) և $f = 0.1$ (2 և 4)
դեպքերում

Եզրակացություն

1. Ուսումնասիրվել է եռակալված տարբեր նյութերից բարակապատ խողովակների կոնական մամլամայրում կորզանման գործընթացի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը շփման բացակայության և առկայության պարագայում՝ օգտագործելով դրանց տարբեր ծակոտկենությունների դեպքերում հոսունության սահմանների $\sigma_{h\nu}$ լարումները՝ արտահայտված եռակալված նյութերից խողովակների հիմնանյութի σ_h - ով և ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության ծակոտկենության երկրորդ ֆունկցիայով:

2. Առաջարկվում է խողովակի դեֆորմացման աստիճանը որոշել ոչ միայն $\mathcal{E}_i$ դեֆորմացիաների ինտենսիվությամբ, այլ նաև դեֆորմացիաների համարժեքայինով $\mathcal{E}_{eq}$, որի համար ստացվել է լարվածային վիճակի բաղադրիչները հաշվի առնվող բանաձև: Դրանցով կատարված հաշվարկային տվյալները ծակոտկենության բացակայության և առկայության դեպքերում ցույց են տալիս, որ փոքր դեֆորմացիաների դեպքերում դրանց արժեքները, մինչև $\varepsilon_i \approx 0,5$ պլաստիկ դեֆորմացիան, բավականին մոտ են մեկը մյուսին, ինչը նշանակում է, որ այդ դեպքերում $\mathcal{E}_{eq}$ - ի փոխարեն կարելի է օգտագործել ավելի հեշտ որոշվող $\mathcal{E}_i$ - ի տվյալները:

3. Թվային հաշվարկները կատարվել են MS EXEL ծրագրային միջավայրում $\alpha = 14^\circ$ կոնականությամբ մամլամայրում բարակապատ խողովակների կորզանման, հպակային շփման f (0 և 0,1), խողովակների նյութի սկզբնական ծակոտկենության v_0 (5 և 10%) դեպքերում: Ստացվել են խողովակների չափագուրկ լարումների, ինչպես նաև ε_θ - ի, ε_i - ի և ν - ի r/r_0 հարաբերությունից կախված փոփոխության արժեքները, որոնք հնարավոր կլինի կիրառել գործարանային և լաբորատոր պայմաններում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975.- 400 с.
2. **Джонсон У., Меллор П.Б.** Теория пластичности для инженеров. - М.: Машиностроение, 1979.- 567 с.
3. **Сторожев М.Б., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. -М.: Машиностроение, 1977. -423с.
4. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Металлургия,1988.-153с.
5. **Petrosyan G.L., Hambardzumyan A.F.** Investigation of porous materials processing in conic dies // NATO Workshop. Recent Developments in Computer Modelling of Powder Metallurgy Process.- Kiev, 2000.- IOS Press, Amsterdam. NATO Science. Series III.- 2001.- Vol 176.- P.204-216.
6. **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.
7. **Петросян Г.Л., Акопян Н.Г., Левонян Г.Л.** Исследование напряженного состояния изогнутой спеченной широкой полосы // Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение.-Ереван, 2018.- N1.- С. 9-17.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.02.2019:

Г.Л. ПЕТРОСЯН, М.А. МАРГАРЯН, Г. Г. ВАРДАНИЯН, А.А. БАБАЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ
СПЕЧЕННОЙ ТРУБЫ ЧЕРЕЗ КОНИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ**

Упрощенным методом исследовано напряженно-деформированное состояние процесса волочения через коническую матрицу тонкостенных труб из различных спеченных материалов при отсутствии и наличии трения. Применяется метод, в соответствии с которым используются напряжения пределов текучести при различной пористости спеченных материалов, которые являются функцией напряжения предела текучести вещества материала и их пористости. Предлагается определить степень деформации трубы не только интенсивностью деформации ε_i , но и эквивалентной деформацией ε_{eq} , для чего была получена формула, учитывающая компоненты напряженного состояния. Расчеты, выполненные при отсутствии и наличии пористости, показывают, что при малых деформациях их значения до 50% пластической деформации довольно близки друг к другу. Это означает, что в формуле определения текущей пористости материала можно использовать данные более простого ε_i сплошного материала. Численные расчеты были выполнены в программной среде MS EXCEL в случае волочения тонкостенных труб через матрицу конусностью 14°.

Ключевые слова: тонкостенная труба, волочение, спеченный материал, пористость, вещество материала, безразмерные напряжения, малые деформации.

G.L. PETROSYAN, M.A. MARGARYAN, G. VARDANYAN, A.A. BABAYAN

**INVESTIGATING THE PROCESS OF DRAWING OF A THIN-WALLED
SINTERED PIPE THROUGH A CONICAL MATRIX**

By a simplified method, the stress-strain state of the drawing process of thin-walled pipes through a conical matrix from various sintered materials at the absence and presence of a sliding friction is investigated. A method is used, according to which the stresses of the yield points at a varying porosity of sintered materials which are a function of the stress of the yield point of the material substances and their porosity are used. It is proposed to define the degree of deformation of a pipe not only by the ε_i deformation intensity, but also by the ε_{eq} equivalent deformation for which the formula considering the stress state components is received. The calculations performed at the absence and presence of porosity show that at small deformations, their values up to 50% of plastic deformation are quite close to each other. It means that in the formula definition, the porosity of the material data of a simpler formula ε_i of continuous materials can be used. Numerical calculations were carried out in the MS EXCEL program environment in case of drawing thin-walled pipes through a matrix of taper 14°.

Keywords: thin-walled pipe, drawing, sintered material, porosity, material substance, dimensionless stress, small deformations.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Է.Ս. ՇՈՒԽՅԱՆ

**ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴԱՐՁԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԵՐԿՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏՍԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՎՐԱ**

Հետազոտվել է տարբեր նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների փոփոխությունը՝ կախված ջերմաստիճանից, որի արդյունքում բացահայտվել են երկմետաղական կառուցվածքով արտադրատեսակների, այդ թվում՝ նաև կտրող գործիքների ստացման առանձնահատկությունները: Փորձագիտական հետազոտությունների արդյունքում կապ է ստեղծվել մետաղական փոշենյութերի ջերմային ընդարձակման գործակցի (α), ծակոտկենության (θ), ջերմաստիճանի (T) և պլաստիկության միջև, համաձայն որի մնացորդային ծակոտկենության մեծացման դեպքում (մինչև 10%) ջերմային ընդարձակման գործակիցն իջնում է, որը բացատրվում է տաքացման գործընթացում տեղի ունեցող պլաստիկ դեֆորմացիաներով: Ցույց է տրված, որ ծակոտկենության հաշվին կարելի է կարգավորել տարբեր պլաստիկություն ունեցող նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցը 30...40%-ի սահմաններում:

Առանցքային բառեր. ջերմային ընդարձակման գործակից, փոշեկոմպոզիտային նյութ, երկմետաղական կառուցվածք, կտրող գործիք, ծակոտկենություն, պլաստիկ դեֆորմացիա, միկրոկառուցվածք:

Ներածություն. Հայաստանի Հանրապետության տնտեսության զարգացման գերակա ուղղություններից է մետալուրգիան և մետաղական հիմքով նոր համաձուլվածքների ու ֆունկցիոնալ հատկություններով օժտված կոմպոզիտային նյութերի ստեղծումը, առանց որոնց անհնար է պատկերացնել տեխնիկական առաջընթացը, հատկապես մեքենաշինության և ռազմական արդյունաբերության հետագա զարգացումը: Այս գործընթացում մեծ տեղ է հատկացվում նյութերի տնտեսմանը, ինչպիսիք են, օրինակ, արագահատ պողպատները, գունավոր մետաղները և այլն: Ելնելով նշվածից, խիստ հեռանկարային է երկմետաղական կառուցվածքով արտադրատեսակների [1, 2], այդ թվում՝ կտրող գործիքների պատրաստումը [3-5], որոնց կտրող մասը պատրաստվում է արագահատ, իսկ կոնստրուկցիոն մասը՝ կոնստրուկցիոն պողպատներից: Քանի որ այս պողպատներն ունեն տարբեր ջերմաֆիզիկական հատկություններ (ջերմունակություն, ջերմահաղորդականություն, ջերմային ընդարձակման գործակից և այլն), հետևապես՝ տաքացման և սառեցման ժամանակ դրանք կենթարկվեն տարբեր դեֆորմացիաների, ինչը անթույլատրելի է:

Ելնելով վերոհիշյալից, հետազոտության նպատակն է ուսումնասիրել տարբեր նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների փոփոխությունը՝ կախված ջերմաստիճանից, ծակոտկենությունից, և բացահայտել երկմետաղական կառուցվածքով արտադրատեսակների ստացման առանձնահատկությունները:

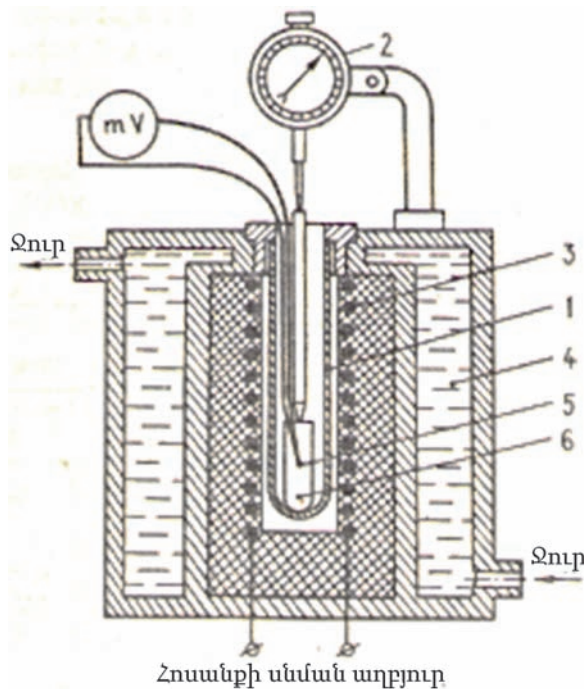
Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Թրծված վիճակում արագահատ պողպատներն ունեն երկու անգամ ավելի փոքր ջերմահաղորդականություն, քան կոնստրուկցիոն պողպատները, իսկ միաված վիճակում այդ տարբերությունն ավելի է մեծանում [6]: Այդ իսկ պատճառով երկմետաղական կոնստրուկցիաներում, ինչպիսիք են, օրինակ, «արագահատ պողպատ-կոնստրուկցիոն պողպատ» կառուցվածքով գործիքները, անցումային շերտում առաջանում են նշանափոխ լարումներ: Այդ է պատճառը, որ կոնստրուկցիոն պողպատի ընտրումը, որը կունենա արագահատ պողպատի ջերմաֆիզիկական հատկություններին մոտ հատկություններ, հանդիսանում է խիստ կարևոր խնդիր: Որոշ պողպատների ջերմաֆիզիկական հատկությունները նորմալացումից հետո բերված են աղ. 1-ում: Սակայն այս տվյալները բավարար չեն երկմետաղական կառուցվածքներով կոնստրուկցիաների միջուկի կամ պոչամասի պողպատի ընտրության համար: Պետք է ուսումնասիրել բերված պողպատների ջերմային ընդարձակման գործակիցի փոփոխությունը ջերմամշակման ընթացքում:

Աղյուսակ 1

Նորմալացված պողպատների ֆիզիկական հատկությունները

Պողպատի մակնիշը	Նորմալ առաձգականության մոդուլը՝ $E, \text{ՄՆ/մ}^2$	Գծային ընդարձակման գործակիցը՝ $\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}} \times 10^6 \text{ աստ}^{-1}$	Ջերմունակությունը՝ $C, \text{Ջ/աստ (0-400}^{\circ}\text{C)}$	Ջերմահաղորդականությունը, $\lambda_{\text{տ}}/(\text{մ. K})$ (200°C)	Տեսակարար Էլեկտրադիմադրությունը՝ $\rho, \text{մկՕմ.սմ}$	Տեսակարար զանգվածը՝ $\gamma, \text{գր/սմ}^3$
45	204000	13,1	0,482	0,048	15,1	7,85
60	208000	13,5	0,528	0,053	17,2	7,80
У8	225000	-	-	-	-	7,83
40X	218500	12,8	-	0,043	15,2	7,85
40XΦA	207100	12,0	-	0,053	15,1	7,81
35XГCA	210000	12,0	-	0,038	-	7,85
38XMIOA	203000	12,3	-	0,038	-	7,71
P6M5	232000	11,4	-	0,097	-	8,10

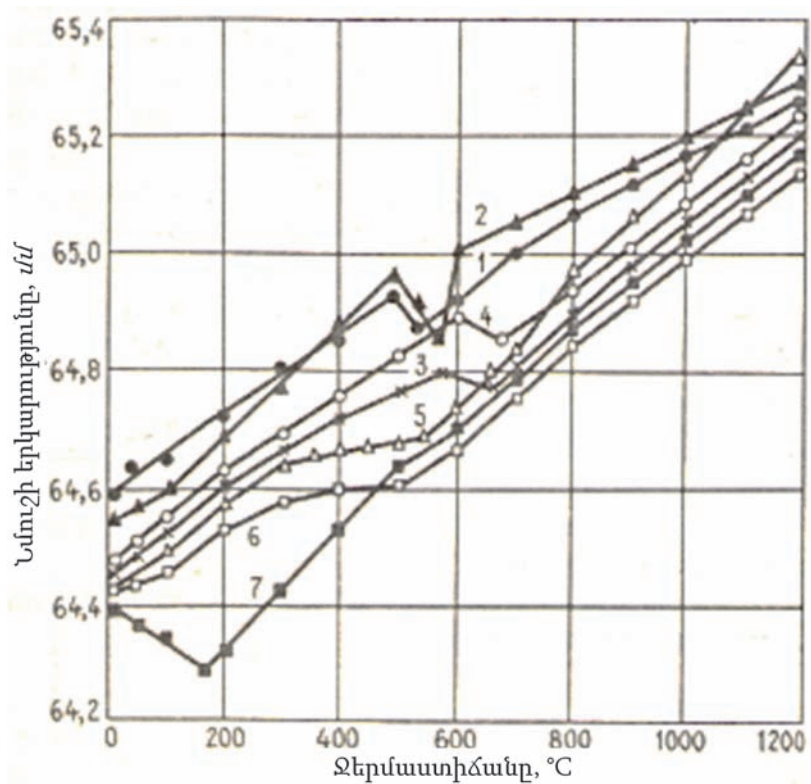
Հետազոտության արդյունքները. Հետազոտությունների համար պատրաստվել է ցուցասարք, որն աշխատում է ДКВ-5A մակնիշի ավտոմատ քվարցային ընդարձակաչափի սկզբունքով (նկ. 1) [7]:



Նկ. 1. Գուցասարքով աշխատող ընդարձակաչափի սխեման

Սարքը բաղկացած է 1 բռնիչից (քվարցային խողովակ և հրիչ), 2 ցուցասարքով միկրոմետրից և 3 վառարանից, որն ունի 4 սառեցնող շապիկ: Ջերմաստիճանը չափվում է 5 ջերմազույգի միջոցով, որը փակցված է 6 փորձանմուշի մակերևույթին կամ մտցված է փորձանմուշի մակերևույթին արված փոսիկի մեջ: Չափման ժամանակ պետք է պահպանել կայուն հպում փորձանմուշի և ջերմազույգի միջև: $\Phi 8 \times 65$ մմ չափերով փորձանմուշների ճակատային մասերը ենթարկվել են նիկելապատման, որպեսզի խուսափենք կիզաթեփուկի առաջացման հետևանքով չափումների շեղումից: Փորձանմուշների պատրաստման և աշխատանքային պայմանները գործիքի աշխատանքային պայմաններին մոտեցնելու համար դրանք ենթարկվել են ջերմամշակման P6M5 մակնիշի պողպատի ռեժիմներով [6]:

Նկ. 2-ում ցույց է տրված փորձանմուշների երկարության կախվածությունը ջերմաստիճանից: Արդյունքների համեմատական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ տարբեր կոնստրուկցիաներով երկմետաղական գործիքների համար կարելի է ընտրել 35XГСА կամ 40XΦA մակնիշների պողպատները, ինչպես նաև 40XΦ-ПС փոշեպողպատը: Այս պողպատների ջերմային ընդարձակման գործակիցները շատ մոտ են P6M5 մակնիշի արագահատ պողպատի ջերմային ընդարձակման գործակիցին, հատկապես ֆազային փոխակերպության տիրույթում, որը շատ հարմար է հատկապես երկմետաղական գործիքների ջերմային մշակման ժամանակ:



Նկ. 2. Փորձամուշների երկարության կախվածությունը ջերմաստիճանից.
 1- պողպատ 40X, 2- պողպատ 45, 3- պողպատ 40XΦ-ПС, 4- պողպատ 40XΦА, 5- պողպատ
 P6M5, 6- պողպատ 35XГСА, 7- պողպատ 9XC

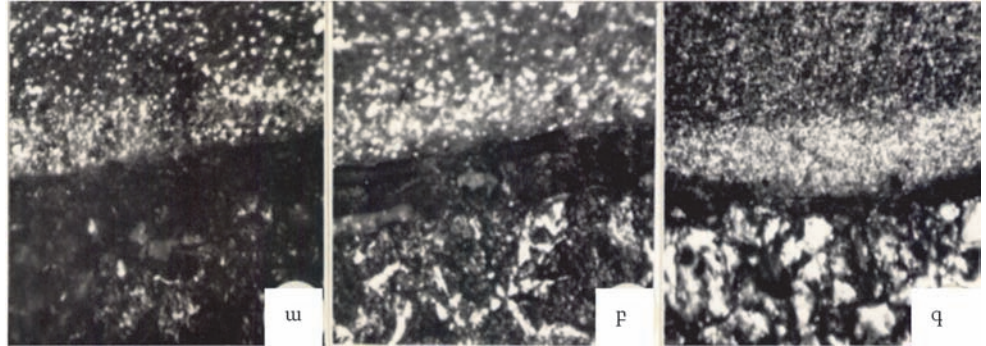
Տաք արտամղված երկմետաղական նյութերի անցումային շերտն ունի բարձր կցման ամրություն (աղ. 2): Ինչպես և սպասվում էր, կցման ամրությունը մեծանում է արտամղման գործակցի (λ) մեծացումով, որն իր առավելագույն արժեքին է հասնում $\lambda=6$ դեպքում: Ջերմային մշակումը (միտում հետագա եռակի արձակումով) գործնականում չի ազդում կցման ամրության վրա:

Տաք արտամղմամբ ($T_w=1050...1100^\circ\text{C}$) ստացված «P6M5 - 40XՓ-ՈՒ» մակնիշի երկմետաղական նյութերի անցումային շերտի կցման ամրությունը լավարկված ռեժիմներով ջերմամշակումից հետո

Ելանյութերը	Տաքացման տևողությունը, ժամ	Արտամղման գործակիցը, λ	Ծակոտկենությունը, %	Կցման ամրությունը՝ $\sigma_{կց}$, $\text{ՄՆ}/\text{մ}^2$	
				թրծված	ջերմամշակված
P6M5-C և 40XՓ-ՈՒ մակնիշների փոշեպողպատներ	0,75...1,0	2	1,5...1,8	240...260	240...260
		4	0,5...0,8	330...350	320...330
		5	չի հայտ.	350...370	340...370
		6	–“–	380...400	370...400
		7	–“–	350...380	350...380
		8	–“–	340...350	320...340
P6M5-ՈՒՍ և 40XՓ-ՈՒ մակնիշների փոշեպողպատներ	1,2...2,0	2	1,0...1,3	190...220	190...210
		4	0,3...0,6	300...310	290...300
		5	չի հայտ.	340...360	330...350
		6	–“–	350...360	330...350
		7	–“–	340...350	330...350
		8	–“–	320...340	320...330
P6M5-ՍՈՒ և 40XՓ-ՈՒ մակնիշների փոշեպողպատներ	0,5...0,75	2	1,1...1,5	200...220	200...210
		4	0,3...0,6	290...310	280...300
		5	չի հայտ.	330...350	320...350
		6	–“–	340...370	340...360
		7	–“–	340...350	330...350
		8	–“–	330...340	320...340

Ծանոթություն՝ փոշեպողպատները ստացվել են. P6M5-C-ն՝ P6M5 պողպատի տաշեղներից, P6M5-ՈՒՍ-ն՝ P6M5 պողպատի մանրացված տաշեղների փոշուց, P6M5-ՍՈՒ-ն՝ P6M5 պողպատի հալոթափչված փոշուց

«Արագահատ պողպատ - կոնստրուկցիոն պողպատ» փոշեկոմպոզիտային նյութի անցումային շերտի միկրոկառուցվածքում հստակ երևում է 40XՓ-ՈՒ փոշեպողպատի կողմում ձևավորված ֆերիտային շերտը (նկ. 3), որն արդյունք է 40XՓ-ՈՒ կոնստրուկցիոն պողպատից ածխածնի ակտիվ դիֆուզիայով դեպի P6M5 մակնիշի արագահատ փոշեպողպատը: Այս շերտում պլաստիկությունը բավականաչափ բարձր է, որը նպաստում է պլաստիկ դեֆորմացիաների գործընթացին՝ առանց ճաքերի առաջացման, ինչպես ջերմամշակման, այնպես էլ գործիքի շահագործման ընթացքում:



Նկ. 3. Տաք արտամղմամբ ստացված երկմետաղական փոշեպողպատների անցումային շերտի միկրոկառուցվածքը P6M5 արագահատ պողպատի ռեժիմներով ջերմամշակումից հետո՝ ա- P6M5-C - 40XΦ-ΠԸ, բ- P6M5-ИП - 40XΦ-ΠԸ, գ- P6M5-ΠΠ - 40XΦ-ΠԸ (x500)

Ջերմաֆիզիկական (աղ. 1) և մեխանիկական (աղ. 2 և 3) հատկությունների վերլուծությունը հնարավորություն է տալիս ընտրել ներքոհիշյալ կոնստրուկցիոն պողպատները երկմետաղական գործիքների համար.

- տաք արտամղմամբ ստացված ձգիչ գործիքների միջուկի համար՝ 40XΦ-ΠԸ մակնիշի կոնստրուկցիոն փոշեպողպատը,

- գոդման և հետագա ջերմամշակմամբ ստացվող երկմետաղական գործիքների իրանների համար՝ 35XГCА մակնիշի կոնստրուկցիոն փոշեպողպատը,

- գոդման գործընթացը միսման հետ զուգակցված երկմետաղական գործիքների իրանների համար՝ 40XΦA մակնիշի կոնստրուկցիոն փոշեպողպատը:

Ընտրված կոնստրուկցիոն փոշեպողպատներում, P6M5 արագահատ փոշեպողպատի ռեժիմներով ջերմամշակումից հետո, տեղի է ունենում ամրային հատկությունների փոքրացում, սակայն դրանք մնում են բավականին բարձր, օրինակ, 40XΦ-ΠԸ համար $\sigma_d=750 \text{ } \overline{U\overline{L}}/iP$, $\delta=8\%$, և ամբողջությամբ բավարարում են գործիքին ներկայացվող պահանջները: 40XΦ-ΠԸ մակնիշի կոնստրուկցիոն փոշեպողպատի միկրոկառուցվածքը, P6M5 արագահատ փոշեպողպատի ռեժիմներով ջերմամշակումից հետո, ներկայացնում է սորբիտանման և մանր թերթավոր պեղիտ:

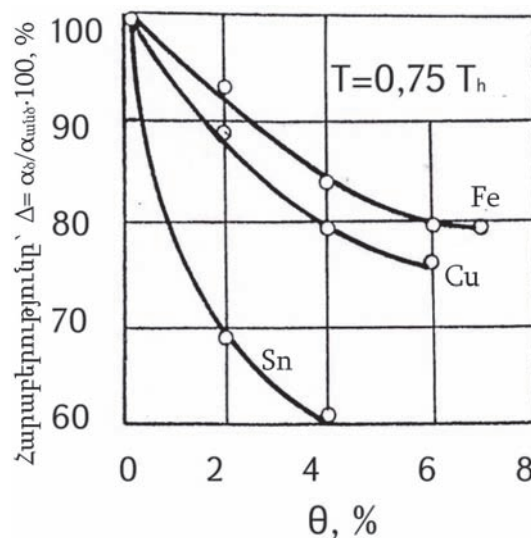
P6M5 մակնիշի արագահատ պողպատի ռեժիմներով նորմալացված և ջերմամշակված կոնստրուկցիոն պողպատների մեխանիկական բնութագրերը

Պողպատի մակնիշը	Հոսունու- թյան սահմանը՝ $\sigma_h, \text{ՄՆ/մ}^2$	Ամրության սահմանը՝ $\sigma_s, \text{ՄՆ/մ}^2$	Հարաբե- րական երկարա- ցումը՝ δ , %	Հարաբե- րական նեղացումը՝ ψ , %	Հարվա- ծային մածուցի- կությունը՝ KCU, Ջ/մմ^2	Նախա- պատրաստ- վածքի կարծրու- թյունը՝ HB, ՄՊա	Կարծրու- թյունը թրծված վիճակում՝ HB, ՄՊա	Կարծրությունը 1200°C մխումից և 560°C 1 ժամ պահամաբ եռակի արձակումից հետո՝ HRC
45	360	610	16	40	50,0	1900...1930	1780...1800	19,0...20,0
40X	350	670	14	35	35,0	2160...2180	1960...1980	28,0...29,0
40XΦA	500	750	12	40	40,0	2410...2420	2280...2300	40,0...41,0
35XГCА	130*	165*	9*	40*	4,0*	2340...2360	2280...2300	34,0...35,5
18XГT	430	700	18	55	100,	2160...2180	2060...2090	21,0...22,5
38XМЮA	300	700	25	50	120,0	2280...2300	1960...1980	34,0...35,0
XBT	-	-	-	-	-	2280...2300	2000...2020	40,0...41,0
9XC	-	-	-	-	-	2290...2300	1880...1900	40,0...41,5
IIIX15	-	-	-	-	-	2410...2420	2060...2080	36,0...37,0
40XΦ-ΠC	-	-	-	-	-	2410...2430	2290...2320	40,0...42,0
P6M5	-	-	-	-	-	2400...2420	2290...2310	63,0...64,5

*) Տվյալները վերաբերում են տվյալ պողպատի միաված և արձակված վիճակին, HRC 40...50:

Ինչպես երևում է աղյուսակից, շերտավոր կոմպոզիտային նյութերի համակարգի սինթեզն անմիջականորեն կախված է շերտերի նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների (ՋԸԳ) արժեքների մոտավոր հավասարությունից, որոնց կարգավորման եղանակներից մեկը լեգիրող տարրերով շերտերի նյութերի լեգիրումն է: Սակայն այս մեթոդը քիչ արդյունավետ է, և ՋԸԳ-ի փոփոխությունը տատանվում է 6...8%-ի սահմաններում [8]: Այս կապակցությամբ մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում ՋԸԳ-ի վրա փոշեկոմպոզիտային նյութերի ծակոտկենության հետազոտումը:

Փորձանմուշները պատրաստվել են երկաթի (ПЖ4М1), պղնձի (ПМС-1) և անագի (ПГО-1) փոշիներից, որոնք ունեն իրարից խիստ տարբեր ջերմային ընդարձակման գործակիցներ: Եռակալումը կատարվել է համապատասխանաբար 1150°C, 950°C և 165°C ջերմաստիճաններում 2,0 ժամ տևողությամբ: Փորձի արդյունքները ներկայացված են նկ. 4-ում:



Նկ. 4. ՋԸԳ-ի վրա ծակոտկենության ազդեցությունը. $\alpha\delta$ -ը ծակոտկեն մետաղի ՋԸԳ-ն է, իսկ $\alpha_{անծ}$ -ը՝ անծակոտկեն մետաղինը

Ինչպես տեսնում ենք, ծակոտկենության մեծացմանը զուգընթաց ՋԸԳ-ն փոքրանում է և այնքան արագ, որքան պլաստիկ է մետաղը: Օրինակ, $\theta=4\%$ դեպքում Sn-ի ՋԸԳ-ն իջնում է ~40%-ով, Cu-ը՝ ~20%-ով, իսկ Fe-ը՝ ~15%-ով: Դա կարելի է բացատրել մետաղների հոսունությամբ [9].

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \beta t^n + kt,$$

որի մեծությունը, ըստ Լապլասի հավասարման, պայմանավորված է լարումով [10].

$$\sigma = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

որտեղ γ -ն մակերևութային էներգիան է, r_1, r_2 –ը՝ կորության շառավիղները:

Երբ լարումը գերազանցում է հոսունության սահմանը ($\sigma_{0,2}$), դեֆորմացիան ընթանում է փոքրագույն դիմադրության ուղղությամբ, այսինքն՝ ծակոտիների կողմը, որը հաստատվում է փորձնական տվյալներով: Այսպես, օրինակ, γ -ի հարաբերակցությունը կազմվում է 1,0:1,5:2,0 ($\gamma_{Sn} = 730$, $\gamma_{Cu} = 1000$ և $\gamma_{Fe} = 1500$ $ՄՋ/մ^2$), իսկ $\sigma_{0,2}$ -ի հարաբերակցությունը՝ 1:2:10 ($\sigma_{0,2Sn} = 11,8$, $\sigma_{0,2Cu} = 59$ և $\sigma_{0,2Fe} = 11,2$ $ՄՊա$): Այդ պատճառով պլաստիկ մետաղների (Sn) ՋԸԳ-ի նվազումը ավելի ցայտուն է:

Փոշեկոմպոզիտային նյութերի ՋԸԳ-ի (α), ծակոտկենության (θ), ջերմաստիճանի (T) և պլաստիկության միջև փոխադարձ կապը կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$\alpha = (\alpha_0 - a\theta) f(T^m / \sigma_{0,2}^n),$$

որտեղ α_0 -ն անծակոտկեն նյութի ՋԸԳ-ն է տվյալ ջերմաստիճանում, a -ն, m -ը և n -ը՝ նյութի պլաստիկության գործակիցները, որոնք որոշվում են փորձնականորեն:

Հետազոտության արդյունքները ցույց են տվել, որ ծակոտկենության հաշվին կարելի է կարգավորել տարբեր պլաստիկություն ունեցող նյութերի ՋԸԳ-ն 30...40%-ի սահմաններում:

Եզրակացություն. Բացահայտվել են երկմետաղական կառուցվածքով արտադրատեսակների, այդ թվում՝ նաև կտրող գործիքների ստացման առանձնահատկությունները, համաձայն որի երկմետաղական կոմպոզիտային նյութերի ձևավորման ընթացքում կարևոր նշանակություն ունեն անցումային շերտի առաջացումը և շերտերի նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների համարժեքությունը, ընդ որում, համարժեքությունը պետք է պահպանվի ոչ միայն աշխատանքային պայմաններում, այլ նաև ջերմային մշակման ժամանակ՝ ամբողջ ջերմաստիճանային միջակայքում:

Փորձագիտական հետազոտությունների արդյունքում կապ է ստեղծվել մետաղական փոշենյութերի ջերմային ընդարձակման գործակցի (α), ծակոտկենության (θ), ջերմաստիճանի (T) և պլաստիկության միջև: Ցույց է տրված, որ ծակոտկենության հաշվին կարելի է կարգավորել տարբեր պլաստիկություն ունեցող նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցը 30...40%-ի սահմաններում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Աղբալյան Ս.Գ., Սարգսյան Ա.Ռ.** Բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ և ջերմակայունությամբ պղնձի հիմքով փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա. - 2017. - Հատ. LXX, №4. - էջ 411-419:

2. **Աղբալյան Ս.Գ., Սարգսյան Ա.Ռ.** Պղնձի հիմքով շերտավոր փոշեկոմպոզիտային նյութերի տաք արտադրման գործընթացի հետազոտումը // Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրաբեր.- 2017.- Հատ. 14, №4.- էջ 586-592:
3. **Манукян Н.В., Петросян Г.Л., Петросян Х.Л., Агбалян С.Г.** Исследование процессов получения протяжного инструмента составной конструкции // VII Международное совещание по порошковой металлургии в ГДР.- Дрезден, 1981.- С. 71-81.
4. **Агбалян С.Г.** Разработка и исследование технологии изготовления протяжного инструмента из порошков быстрорежущих сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Киев, 1984.- 24 с.
5. **Ключко Н.А.** Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента.- М.: Металлургия, 1981.- 200 с.
6. **Геллер Ю.А.** Инструментальные стали.- М.: Металлургия, 1975.- 584 с.
7. **Черепин В.Т.** Экспериментальная техника в физическом металловедении.- Киев: Техника, 1968.- 280 с.
8. **Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г.** Материаловедение.- М.: Металлургия, 1984.- 384с.
9. **Салтыков С.А.** Стереометрическая металлография.- М.: Металлургия, 1970.- 3-е изд.- 376с.
10. **Микрюков В.Е.** Теплопроводность и электропроводность металлов и сплавов.- М.: Металлургиздат, 1959.-260с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.12.2018:

С.Г. АГБАЛЯН, А.А. ПЕТРОСЯН, Е.С. ШУХЯН

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ НА СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованы коэффициенты теплового расширения разных материалов в зависимости от температуры, в результате чего обнаружены особенности получения детали с биметаллическими структурами, в том числе режущих инструментов. В результате экспериментальных исследований установлена связь между коэффициентом теплового расширения (α), пористостью (θ), температурой (T) и пластичностью металлпорошковых материалов, согласно которой коэффициент теплового расширения уменьшается в случае повышения остаточной пористости (до 10%), что объясняется пластической деформацией в процессе нагрева. Показано, что за счет пористости можно управлять коэффициентом теплового расширения материалов разной пластичности в пределах 30...40%.

Ключевые слова: коэффициент теплового расширения, порошковый композиционный материал, биметаллическая структура, режущий инструмент, пористость, пластическая деформация, микроструктура.

S.G. AGHBALYAN, A.A. PETROSYAN, E.S. SHUKHYAN

**THE INFLUENCE OF THE FACTOR OF THERMAL EXPANSION ON THE
PROPERTIES OF BIMETALLIC POWDER COMPOSITE MATERIALS**

Coefficients of thermal expansion of various materials are investigated, depending on temperature as a result of which the peculiarities of obtaining parts with bimetallic structures, including the cutting tools have been found. As a result of pilot studies, the relation between the coefficient of thermal expansion (α), porosity (θ), temperature (T) and plasticity of metal powder is established, according to which the coefficient of thermal expansion decreases in case of an increase in the residual porosity (up to 10%) explained by plastic deformation in the heating process. It is shown that due to porosity, it is possible to regulate the coefficient of thermal expansion of materials within 30...40%.

Keywords: coefficient of thermal expansion, powder composite material, bimetallic structure cutting the tool, porosity, plastic deformation, microstructure.

Г.А. АГАРОНЯН, Л.С. АКОПЯН, А.Г. АГАРОНЯН

**РЕГУЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДРОБЛЕНИЯ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ
МАССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕРУДНЫХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Разработка месторождений нерудных строительных материалов, используемых для производства щебня взрывом, вызывает необходимость сохранить естественную прочность породы, а также уменьшить выход переизмельченных и негабаритных фракций взорванной массы. Установлено, что выход некондиционных (переизмельченных и негабаритных) фракций взорванной породы зависит от блочности (трещиноватости) разрушаемого массива и величины энергии заряда взрывчатого вещества (ВВ), а также характера распределения энергии взрыва в среде.

В статье предложена новая технология взрывания путем применения скважинных зарядов, состоящих из смеси промышленных ВВ и гранул пенополистирола, а также создания контурной трещины за последним рядом скважин. Это позволит поднять колонку заряда в скважине, получить гладкую поверхность откоса уступа, что улучшит качество дробления в зонах забойки и откоса уступа.

Ключевые слова: выход переизмельченных и негабаритных фракций, блочность массива, плотность взрывчатой смеси, контурное взрывание, зона заряда взрывчатого вещества, зона забойки.

Введение. Известно, что в процессе взрывного разрушения качество дробления горной породы определяется последующими процессами добычи и переработки полезных ископаемых. При разработке месторождений нерудных строительных материалов, используемых для производства щебня, качество дробления породы взрывом характеризуется выходом некондиционных (переизмельченных и негабаритных) фракций. В процессе отбойки пород на щебень необходимо сохранить естественную прочность породы, а также уменьшить выход переизмельченных и негабаритных фракций.

Выход некондиционных фракций взорванной породы зависит от физико-механических свойств и структурных особенностей массива, а также от величины энергии заряда взрывчатого вещества, параметров взрывного импульса (амплитуда и длительность) и характера распределения энергии взрыва в среде.

Известно, что увеличение энергии заряда ВВ способствует уменьшению выхода негабаритных кусков. Однако это связано с такими негативными явлениями, как повышение выхода переизмельченных фракций, снижение прочности кусков отбитой горной массы, увеличение негладкой зоны откола, а

также сейсмического воздействия взрыва и разброса отдельных кусков взорванной породы.

Необходимо отметить, что при отбойке трещиноватых пород влияние величины энергии заряда ВВ на качество дробления существенно ограничено. Причем эффект дробления при увеличении энергии заряда ВВ зависит от интенсивности трещиноватости массива и резко снижается с ее увеличением.

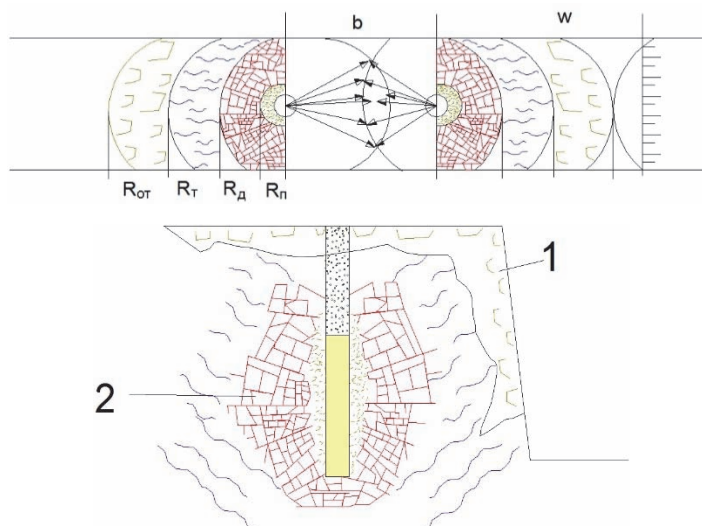
Трещиноватость (блочность) горного массива и прочность слагающих их пород являются существенными природными факторами, влияющими на характер взрывного разрушения скальных пород. Трещины оказывают экранирующее действие на распространение энергии взрыва, локализуют разрушение отдельностями, расположенными вокруг заряда ВВ, а на больших расстояниях отдельности могут разрушаться только за счет их соударения между собой.

Характерной особенностью нерудных строительных карьеров Армении, представленных известняками, песчаниками, базальтами и другими породами, является крупноблочное строение массивов. Выход негабаритных фракций на этих карьерах значителен.

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является создание и обоснование новых методов управления энергией заряда при взрыве в крупноблочных массивах, позволяющих повысить использование энергии взрыва на снижение выхода переизмельченных и негабаритных фракций.

Постановка задачи и обоснование методики. При отбойке сплошными скважинными зарядами в крупноблочных породах волны напряжений с амплитудами, превышающими предел прочности горных пород, распространяются в основном в пределах блока, содержащего заряд ВВ. При переходе через трещину волны напряжений, достигающие верхней части уступа, обладают низкой амплитудой в силу отражения и преломления наконтактных слоев. В этом случае верхняя часть уступа, находящегося в зоне забойки (неактивной части скважины), не подвергается дроблению взрывом, а разваливается на естественные отдельности (рис.1). Установлено, что в крупноблочных массивах энергия взрыва, затрачиваемая на дробление среды, составляет всего 2...8% потенциальной энергии ВВ [1]. Причем при применении сплошных колонковых зарядов значительная часть (20...30%) энергии взрыва расходуется на пластические деформации и на переизмельчение среды в ближней зоне заряда, что и обуславливает интенсивную диссипацию энергии ВВ.

При взрыве зарядов ВВ образуются отдельные зоны разрушения (рис.1): переизмельчения, дробления, радиального трещинообразования и откольная зона.



*Рис.1. Образование зон разрушения и откольных слоев:
 $R_п$ – радиус зоны переизмельчения; $R_{др}$ – радиус зоны дробления;
 R_m – радиус зоны трещинообразования; $R_{от}$ – радиус откольных зон;
 1 – зона нерегулируемого дробления, 2 – зона регулируемого дробления*

В зоне дробления, непосредственно примыкающей к полости взрыва, происходит наиболее интенсивное разрушение породы с образованием значительного количества мелких фракций (зона переизмельчения).

В зоне радиального трещинообразования тангенциальные растягивающие напряжения превышают предел прочности пород и образуют радиальные трещины. Вблизи границы зоны трещинообразования и вне ее существует зона нерегулируемого дробления (разрушение пород происходит по естественным трещинам). На границе зоны трещинообразования и нерегулируемого дробления при взрыве последних рядов скважинными зарядами образуется неровная поверхность откола (негладкая наклонная поверхность уступа), которая является очагом выхода негабарита.

Это указывает на необходимость изыскания путей снижения диссипативных потерь энергии взрыва в ближней зоне заряда ВВ, улучшения разрушающего действия взрыва в зоне забойки, а также создания гладкой поверхности откола, позволяющей уменьшить выход переизмельченных и негабаритных фракций.

Для достижения этой цели нами была предложена новая технология взрывных работ, позволяющая решить следующие задачи:

- применение взрывчатых смесей, позволяющих регулировать насыпную плотность и скорость детонации, что приводит к улучшению качества дроб-

ления в зоне забойки и снижению переизмельченных фракций в ближней зоне заряда ВВ;

– создание контурной трещины за последним рядом скважин (контурное взрывание), которое образует гладкую поверхность откола и увеличивает зону разрушения.

Механизм разрушения трещиноватых горных пород определяется давлением газообразных продуктов детонации ВВ и продолжительностью действия продуктов детонации на разрушаемую среду.

При взрывании сплошными скважинными зарядами газообразные продукты взрыва мгновенно создают в скважине огромное давление (примерно 100^2 МПа), которое намного превосходит прочность горных пород (около 100 МПа) и, следовательно, приводит к образованию мощной волны сжатия. Последняя производит дробление породы в основном за счет раздавливания и переизмельчения [2]. Поэтому для повышения эффективности использования энергии взрыва необходимо создать условия, способствующие дифференцированному распределению энергии взрыва по высоте разрушаемого уступа при низком предельном давлении, но при увеличенном времени его действия. Снижение предельного давления газообразных продуктов взрыва и увеличение времени его воздействия на взрывающую среду создают условия для взаимодействия ударных волн и газовых потоков, благодаря чему еще более увеличивается общее разрушающее действие взрыва.

Радиус зоны переизмельчения при взрывании горных пород определяется по формуле [3]

$$R_n = D (\rho_{ВВ} K_{ПР} / 8 \sigma_{сж})^{1/2}, \quad (1)$$

где D – скорость детонации ВВ, м/с; $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, кг/м³; $K_{ПР}$ – коэффициент преломления ударной волны из зарядной полости в породу; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, МПа.

Предельное давление газообразных продуктов взрыва согласно [4] определяется следующим выражением:

$$P_{np} = 1/8 \rho_{ВВ} D^2 (d_{зар} / 2r_{np})^3, \quad (2)$$

где $d_{зар}$ – диаметр заряда ВВ, м; r_{np} – предельный радиус зарядной полости, м.

Из формул (1) и (2) видно, что предельное давление газообразных продуктов взрыва, а также радиус зоны переизмельчения горных пород зависят от скорости детонации и плотности ВВ, причем при уменьшении плотности ВВ снижается скорость детонации ВВ [4], что приводит к снижению предельного давления газообразных продуктов взрыва. В этой связи нами были приняты взрывчатые смеси, состоящие из обычного промышленного ВВ и гранулиро-

ванного пенополистирола (ПП) (диаметром $d=3...10$ мм и объемным весом $\gamma_{пп} = 0,015...0,030$ г/см³), позволяющие регулировать насыпную плотность и скорость детонации ВВ (табл. 1). Применение гранулированного ПП в качестве компонента взрывчатой смеси обосновано тем, что шарики ПП, находящиеся между гранулами ВВ в определенной пропорции с ним, позволяют регулировать плотность смеси за счет собственной низкой объемной массы. Кроме того, наличие воздушных пор внутри взрывчатой смеси обеспечивает длительное действие давления газообразных продуктов взрыва [5]. Взрывание скважинных зарядов, состоящих из смеси промышленного ВВ и гранулированного ПП, позволяет поднять колонку заряда в скважине, оставляя минимальную длину забойки для улучшения качества дробления верхней части уступа. Применение контурного взрывания позволяет получить ровную оконтуривающую поверхность уступа при правильном выборе параметров взрывания. Основными параметрами контурного взрывания являются диаметр и линейная масса зарядов, расстояние между зарядами.

Таблица 1

Насыпная плотность и скорость детонации взрывчатой смеси в зависимости от содержания пенополистирола

Содержание ПП от общего объема заряда	ANFO	ANFO + ПП
%	плотность, г/см ³	скорость
0	0,8	4000
20	0,65	3700
40	0,58	3400
60	0,35	2600
80	0,20	2100

Для получения ровной поверхности откоса необходимо создать контурную отрезную щель необходимой ширины. Это достигается применением линейных зарядов с воздушным радиальным зазором, причем между диаметром зарядов ($d_{зар}$) и скважин ($d_{ск}$) должно соблюдаться соотношение [6]

$$d_{зар} < d_{ск} / 3, \text{ м.} \quad (3)$$

В этом случае волна напряжения взрыва не превышает предела прочности пород на сжатие. Поэтому волна напряжения, достигнув стенок скважин вокруг заряда, почти не вызывает разрушения, она успевает только ослабить породу вследствие образования линейных трещин.

Опыт ведения взрывных работ на крупноблочных строительных карьерах показывает [7], что применение схемы короткозамедленного взрывания (КЗВ)

с трапецевидным врубом обеспечивает интенсивное дробление и позволяет сократить ширину развала взорванной массы. Поэтому нами была принята схема КЗВ с трапецевидным врубом при помощи внутрискважинного (MS) и поверхностного (НТД) замедлителей. Контурные скважины взрываются одновременно (с помощью детонирующего шнура) до взрыва зарядов рыхления или в одной с ними серии с опережением на 68...136 мс (рис. 2).

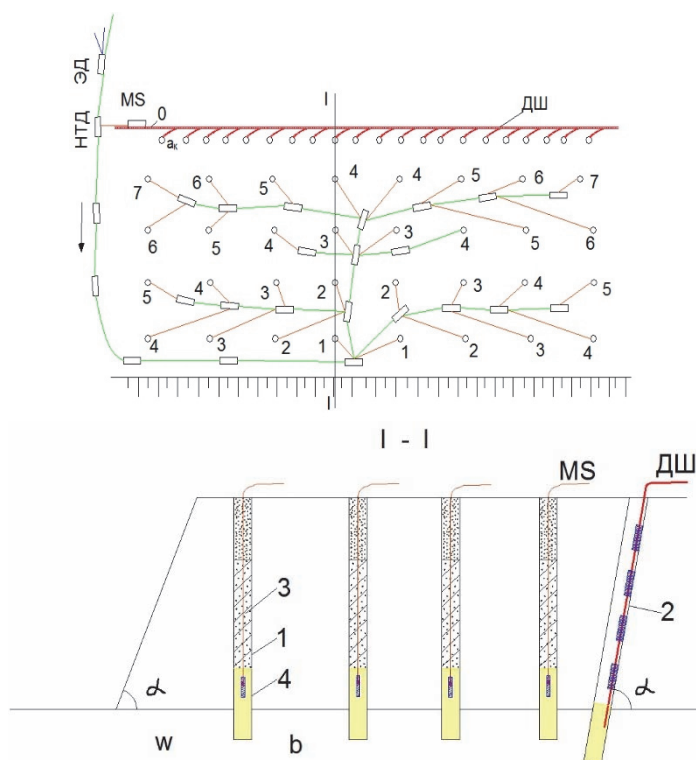


Рис.2. Схема расположения скважин и монтажа взрывной сети при взрывании контурных зарядов и скважинных зарядов, состоящих из смеси промышленного ВВ и гранулированного пенополистирола (З):

1 - скважинный заряд рыхления; 2 - контурная скважина НТД- поверхностные детонаторы; MS- скважинные детонаторы; ДШ- детонирующий шнур; ЭД- электродетонатор; 4-ANFO; 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7- последовательность взрывания

Параметры контурного взрывания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры контурного взрывания

Параметры	Расчетные формулы
Линейная масса заряда $\sigma_{сж}$ – прочность породы на сжатие, МПа; $K_{л\delta}$ – коэффициент преломления продуктов детонации: $K_{л\delta} = 1,0 \dots 2,0$; $K_{т}$ – коэффициент трещиноватости пород: $K_{т} = 1,0 \dots 3,0$	$P_K = 4 \rho_{ВВ} d_{ск}^2 (\sigma_{сж}/K_{л\delta} K_{т})^{2/3}, \text{ кг/м}$
Расстояние между скважинами $d_{зар}$ – диаметр контурного заряда, м	$a_K = (20-25) d_{зар}, \text{ м}$
Длина скважины $a_{ск}$ – угол наклона скважины к горизонтальной плоскости; $a_{ск} = a_{уст.}, \text{ град}$; $a_{уст.}$ – угол откоса уступа, град	$l_{ск} = H/\sin a_{ск} + l_{пер.к}, \text{ м}$
Длина перебура $l_{пер.д}$ – длина перебура при взрыве скважинных зарядов ВВ для рыхления; $K_{ВВ}$ – расчетный удельный расход ВВ; W – линии сопротивления по подошве уступа, м	$l_{пер.к} = l_{пер.д} = 0.5 K_{ВВ} W, \text{ м}$
Длина сплошного заряда (донный заряд)	$l_{зар} = l_{пер.к} + 0.2, \text{ м}$
Длина забойки	$l_{заб} = (10 - 20) d_{зар}, \text{ м}$

Заряд ВВ при контурном взрывании представляет собой гирлянду патронов на ДШ, причем линейная масса заряда регулируется расстоянием между патронами (рис. 3,4). В нижней части контурной скважины помещают сплошной заряд (донный заряд).

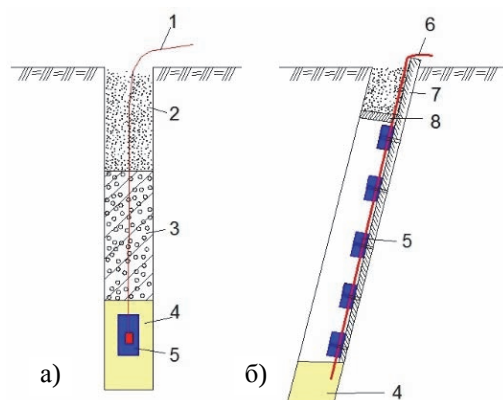


Рис.3. Конструкция сплошного (а) и контурного (б) зарядов:

1 - внутрискважинные детонаторы (MS); 2 - забойка; 3 - ANFO + ПП; 4 - ANFO; 5 - патроны ВВ, 6 - ДШ; 7 - деревянная рейка; 8 - бумажный пыж

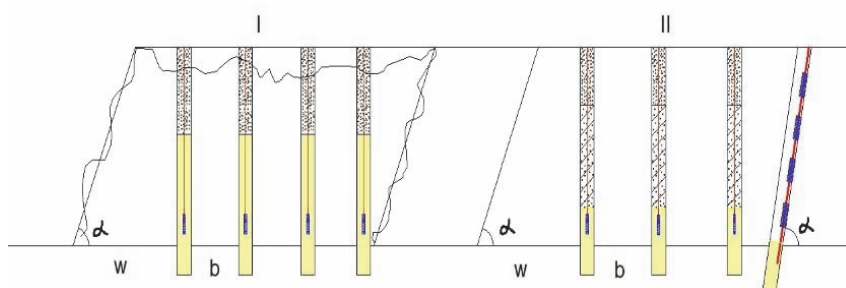


Рис.4. Технология взрывания: I - существующая; II - предлагаемая

Результаты исследования. Предложенная технология взрывных работ использована на Арамусском базальтовом карьере. Показатели взрыва по предлагаемой технологии определялись проведением серии опытно-промышленных взрывов с последующей обработкой и анализом их результатов в сопоставлении с показателями, достигнутыми при существующей технологии взрывных работ.

Арамусский карьер представлен крупноблочными базальтами крепостью 10...12 по шкале М.М. Протодяконова с объемным весом от $2,8 \text{ т/м}^3$.

На опытных взрывах в нижнюю часть скважин размещали ANFO ($D = 4000 \text{ м/с}$, $\rho_{\text{ВВ}} = 0,8 \text{ г/см}^3$), а верхнюю часть скважин заряжали взрывчатой смесью ANFO + ПП ($D = 3400 \text{ м/с}$, $\rho_{\text{ВВ}} = 0,58 \text{ г/см}^3$).

Для взрывания в контурных скважинах принимается патронированный аммонит 6ЖВ. Параметры контурного взрывания определены согласно табл. 2.

Критериями для сравнительной оценки опытно-промышленных взрывов приняты следующие показатели: гранулометрический состав горной массы, удельный расход ВВ, выход негабарита, ширина развала взорванной массы.

Таблица 3

Параметры и результаты опытно-промышленных взрывов

<i>Наименование показателей</i>	<i>Ед.изм.</i>	<i>Технология взрывания</i>	
		<i>традиционная</i>	<i>предлагаемая</i>
Коэффициент крепости взрывае­мых пород по М.М. Прото­дяконову	-	10...12	10...12
<i>Блочность взрывае­мого массива</i>		<i>крупноблочная</i>	
Предел прочности пород на сжатие	<i>МПа</i>	120	120
Объемный вес породы	<i>т/м³</i>	2.8	2.8
Высота уступа	<i>м</i>	6.0	6.0
Диаметр скважин	<i>м</i>	0.115	0.115
Конструкция заряда	ANFO	ANFO/ANFO + ПП ANFO	
Соп­ро­тив­ле­ние по подошве уступа	<i>м</i>	3.6	3.6
Рас­сто­я­ние между скважинами в ряду	<i>м</i>	2.8	2.8
Рас­сто­я­ние между рядами скважин	<i>м</i>	2.8	2.8
Число рядов скважин	<i>м</i>	4	4
Глубина скважин	<i>м</i>	7.2	7.2
Длина заряда, нижний/ верхний	<i>м</i>	4.3	1.8 /3.5
Вес заряда в скважине нижний/ верхний	<i>кг</i>	40.5	16.9/20.5
Длина забойки	<i>м</i>	2.9	1.9
Средняя плотность заряда	<i>г/см³</i>	0.8	0.58
Скорость детонации ВВ	<i>м/сек</i>	4000	3400
<i>Схема взрывания КЗВ с трапециевидным врубом</i>		<i>Контурное взрывание</i>	
Линейная масса заряда	<i>кг/м</i>		1.3
Рас­сто­я­ние между скважинами	<i>м</i>		1.4
Длина скважины	<i>м</i>		7.4
Длина сплошного заряда	<i>м</i>		1.4
Удельный расход ВВ	<i>кг/м³</i>	0.76	0.85
Выход мелкой фракции 0...100 мм	%	26.3	16.8
Выход крупной фракции >800 мм	%	19.8	3.4
Ширина развала	<i>м</i>	38.6	30.8

Гранулометрический состав взорванной горной массы определяли фотопланиметрическим методом, а выход негабарита - поштучным обмером кусков после экскавации. Ширину развала определяли маркшейдерской съемкой. Параметры и результаты опытно-промышленных взрывов приведены в табл. 3.

Анализ результатов взрывов по предложенной технологии позволяет:

- регулировать параметры развала взорванной массы;
- получить более равномерное дробление, при этом выход крупной фракции более 800 мм уменьшается в 5,8 раза, а выход мелкой фракции менее 100 мм уменьшается на 36%;
- поднять колонку заряда в скважине, оставляя минимальную длину забойки для улучшения качества дробления верхней части уступа;
- создать гладкую поверхность зоны откоса уступа для улучшения качества дробления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Пастухов А.И.** Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. - Киев: Наук. думка, 1990.-120 с.
2. **Воробьев В.Д., Перегудов В.В.** Взрывные работы в скальных породах.- Киев: Наук. думка, 1984.-240 с.
3. **Ефремов Э.И.** Управление размерами зон переизмельчения горных пород при их взрывном разрушении // Вісник КТУ: 36. наук. праць. – Вип. 18. – Кривий Ріг, 2007. – С. 36–39.
4. **Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.** Промышленные взрывчатые вещества. - М.: Недра, 1982.- 327с.
5. **Жаркенов М.И., Бекетаев Е.Б., Кинеев Т.А., Жунусов К.Н.** Результаты промышленных испытаний скважинных зарядов с промежутками из гранулированного полистирола // Сб.: Взрывное дело № 78/35. – М.: Недра, 1978. – С. 102-106.
6. **Азаркович А.Е., Шуйфер М.И., Тихомиров А.П.** Взрывные работы вблизи охраняемых объектов. - М.: Недра, 1984.-213с.
7. **Афонин В.Г., Гейман Л.М., Комир В.М.** Справочное руководство по взрывным работам в строительстве. - Киев: Будівельник, 1974. -382с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 16.12.2018.

Գ.Ա. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Լ.Ս. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ

ՊԱՅԹԵՑՎԱԾ ԼԵՈՒԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ՄԱՆՐԱՅՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՒՄԸ ՇԻՆԱՆՑՈՒԹԵՐԻ ՈՉ ՀԱՆՔԱՔԱՐԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Խճաքարի արտադրության համար ոչ հանքաքարային շինանյութերի հանքավայրերի պայթեցմամբ մշակումը պահանջում է պահպանել ապարի բնական ամրությունը, ինչպես նաև փոքրացնել պայթեցված զանգվածի գերմանրացման և արտաչափս ֆրակցիաների ելքը: Սահմանվել է, որ պայթեցված ապարների ոչ կոնդիցիոն ֆրակցիաները կախված են պայթեցվող զանգվածի բլոկավորվածությունից (ճեղքավորվածությունից) և պայթուցիկ նյութի լիցքի էներգիայի մեծությունից, ինչպես նաև միջավայրում պայթեցման էներգիայի բաշխման բնութագրից:

Առաջարկվել է պայթեցման նոր տեխնոլոգիա, որը հնարավորություն է տալիս բարձրացնել լիցքի երկարությունը, ստանալ հարթ մակերեսով հանքաստիճանի շեպ՝ մանրացման որակը խցանյութի գոտում և հանքաստիճանի թեք մակերևույթում լավացնելու նպատակով:

Առանցքային բառեր. գերմանրացված և արտաչափս ֆրակցիաների ելք, զանգվածի բլոկավորվածություն, պայթուցիկ խառնուրդի խտություն, եզրագծային պայթեցում, պայթուցիկ նյութի լիցքի գոտի, խցանյութի գոտի:

G.A. AHARONYAN, L.S. HAKOBYAN, A.G. AHARONYAN

**REGULATING THE DEGREE OF CRUSHING THE EXPLODED ROCK MASS
WHEN DEVELOPING THE DEPOSITS OF NON-METAL CONSTRUCTION
MATERIALS**

The development of deposits of non-metallic building materials used for the production of rubble by explosion requires to maintain the natural strength of the rock, as well as reduce the yield of oversized and overcrushed fractions of the exploded mass.

It is established that the yield of substandard (over crushed and oversized) fractions of a blasted rock depends on the blockiness (fracture) of the destroyed massif and the magnitude of the explosive charge energy (EX), as well as the nature of the explosion energy distribution in the medium.

A new blasting technology has been proposed by applying borehole charges consisting of a mixture of industrial explosives and expanded polystyrene granules, as well as creating a contour crack behind the last row of wells which makes it possible to raise the charge column, to obtain a smooth surface of the escarpment of the ledge to improve the quality of crushing in the damming zone, and in the zone slope of the ledge.

Keywords: yield of oversized and overcrushed fractions, block blockiness of the massif, density of the explosive mixture, contour blasting, explosive charge zone, damming zone.

Н.П. БАДАЛЯН, М.К. БАГДАСАРЯН, Г.П. КОЛЕСНИК

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЭКРАНА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

Рассматриваются вопросы режима экрана силового однофазного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляцией) при заземлении экрана кабеля с двух концов. Получены соотношения для определения тока в “земляном канале” на основании предложенной схемы замещения с учетом сопротивления заземлителей. Приведены расчетные значения тока “земли” для кабелей с СПЭ-изоляцией с различными сечениями экрана. Выполнена оценка перенапряжения на экране кабеля при одностороннем заземлении.

Ключевые слова: однофазное включение, силовой кабель, режим экрана, термическая устойчивость, невозгорание изоляции, заземление экрана, ток, потери мощности.

Силовые кабели, независимо от типа изоляции, выбирают по расчетному току, номинальному напряжению, способу прокладки, условиям окружающей среды и проверяют на термическую устойчивость при коротком замыкании (к.з.) путем расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы [1]. После расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы по термической устойчивости уточняют сечение токоведущих жил силовых кабелей с учетом установленной мощности электроприемников и проверяют его по допустимым потерям напряжения, термической стойкости к воздействию токов к.з. и на невозгорание при протекании токов к.з. [2].

Проверка силовых кабелей на невозгорание при протекании тока к.з. осуществляется из предположения, что максимальный ток, протекающий в кабеле, равен действующему значению тока к.з. в начале линии.

В соответствии с технической политикой ПАО “Россети”, проектируемые, сооружаемые и модернизируемые кабельные линии (КЛ) электропередачи должны выполняться силовым кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена, и поскольку половина производимых кабелей с СПЭ-изоляцией однофазная, то особую актуальность приобретает вопрос обеспечения режима экрана по току и перенапряжениям в случае включения кабеля в однофазном режиме.

Термическая стойкость электропроводящего экрана однофазного силового кабеля в сети 6 ... 35 кВ с изолированной нейтралью обеспечивается, если выполняется следующее условие [1]:

$$I_{\text{д.э}} \geq I_{\text{к}}^{(2)},$$

где $I_{\text{д.э}}$ – длительно допустимый ток медного экрана, кА , значения которого ограничиваются сечением экрана, например:

- для кабеля 220 кВ (сечение экрана 120 мм^2) – 24,36 кА ;

- для кабеля 10 кВ (сечение экрана 25 мм^2) – 19,2 кА ;

$I_{\text{к}}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{\text{к}}^{(3)}$ – ток двухфазного к.з., кА ; $I_{\text{к}}^{(3)}$ – ток трехфазного симметричного к.з., кА .

В сетях 110...500 кВ сечение экранов однофазных кабелей выбирают на ток однофазного к.з. В обоих случаях сечение экрана получается повышенное, поэтому такие кабели в нормальном режиме работы сети требуют решения проблемы с токами и потерями мощности в экранах. Для борьбы с потерями внедряются такие мероприятия, как одностороннее заземление экранов или транспозиция экранов в трехфазном включении, что создает дополнительные проблемы при эксплуатации кабельной линии.

Основным назначением экрана является обеспечение равномерности электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля (изоляцию “жила-экран”), что достигается только в случае заземления экрана. Поэтому электропроводящая оболочка кабеля (экран), как правило, заземлена на его концах и в ряде промежуточных точек (муфтах или транспозиционных узлах). При этом для токов нагрузки однофазного кабеля образуется путь в земле, параллельный проводнику. В этом отношении металлическая оболочка кабеля аналогична заземленным тросам у воздушной линии. На распределение тока между оболочкой и землей существенное влияние оказывает не только собственное сопротивление оболочки (экрана), но и сопротивление ее заземлений, значения которых зависят от характера прокладки кабеля (траншея, блоки, туннель, эстакада и т.д.) и ряда других факторов.

При использовании однофазного силового кабеля с СПЭ-изоляцией с незаземленным экраном или заземленным с одного конца для питания однофазной нагрузки значение длительно допустимого тока следует выбирать по сечению экрана, поскольку сечение экрана всегда в несколько раз меньше сечения токопроводящей жилы.

В однофазном режиме при заземлении экрана с двух концов ток нагрузки протекает по экрану и “земляному каналу” с сопротивлениями земли $R_{\text{з}}$ и заземлителей $R_{\text{зз}}$ (рис.). Тогда для тока жилы кабеля и суммарного сопротивления “земляного канала” справедливы соотношения $I_{\text{ж}} = I_{\text{з}} + I_{\text{зз}}$; $R_{\text{з}\Sigma} = R_{\text{з}} + 2R_{\text{зз}}$.

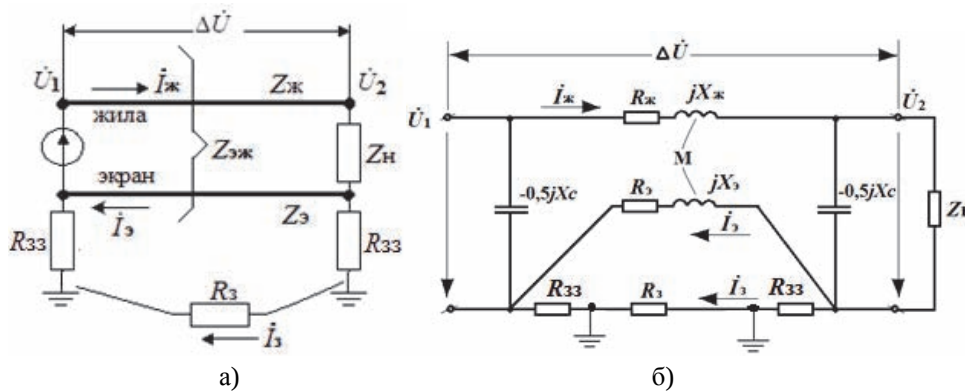


Рис. Кабельная линия с однофазным кабелем с СПЭ-изоляцией: а - в однофазном включении; б - схема замещения с сопротивлениями заземлителей $R_{жзз}$

Однофазную КЛ, выполненную кабелем с СПЭ-изоляцией, можно смоделировать схемой замещения (рис. б), параметры элементов которой определяются по известным соотношениям:

- погонные активные сопротивления жилы и экрана кабеля:

$$R_{жс} = R_{0жс} \cdot \ell, \text{ Ом}; R_{0жс} = \rho / S_{жс}, \text{ Ом/км}; R_{э} = R_{0э} \cdot \ell, \text{ Ом}; R_{0э} = \rho / S_{э}, \text{ Ом/км},$$

где $\rho = 17,5 \div 18,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$ - для электротехнической меди и $29 \div 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$ - для алюминия и его сплавов; $S_{жс}, S_{э}$ - площадь поперечного сечения жилы и экрана кабеля, мм^2 , соответственно; ℓ - протяженность кабельной линии, км.

Значения сопротивлений заземлителей $R_{жзз}$ для напряжений выше 1 кВ принимаем 2, 4 или 8 Ом для подстанций до 35 кВ в зависимости от значения низшего напряжения и менее 10 Ом для напряжений выше 110 кВ (ПУЭ).

Известно [3], что для однофазного силового кабеля с СПЭ-изоляцией значения собственной индуктивности экрана и взаимной индуктивности “жила-экран” равны и определяются по формуле

$$L_{э} = M_{жэ} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{d},$$

где $D_3 = \left(2,085 / \sqrt{f \cdot \lambda \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ м}$ - эквивалентная глубина возврата тока через землю; d - расстояние от центра токопроводящей жилы до экрана, мм; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}$ - магнитная проницаемость; λ - удельная проводимость земли, $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$; f - частота напряжения питающей сети, Гц.

Индуктивность токопроводящей жилы кабеля можно определить по известной эмпирической формуле [4]

$$L_{\text{ж}} = \left(0,46 \lg \frac{d}{r_{\text{ж}}} + 0,05\mu \right) \cdot 10^{-3},$$

где $r_{\text{ж}}$ - радиус токопроводящей жилы кабеля; μ - магнитная проницаемость материала токопроводящей жилы кабеля, Гн/м.

Токораспределение в ветвях схемы, показанной на рис. а, определим, анализируя схему замещения, представленную на рис. б, в которой силовой кабель концентрической (коаксиальной) структуры моделируется Т-образной схемой замещения с параметрами активного и реактивного сопротивлений и емкостью между токоведущей жилой и экраном. Экран моделируется продольными активным и реактивным сопротивлениями. Емкость экран-земля не учитываем из-за большой (порядка 1000 м) глубины протекания тока возврата, что также решает вопрос неучета способа прокладки силового кабеля.

Зарядную мощность кабельной линии (зарядные токи), моделируемую поперечными элементами X_c , при напряжениях 6...20 кВ можно не учитывать ввиду ее малости по сравнению с реактивной мощностью нагрузки. С учетом этого условия уравнения электрического состояния схемы на рис. б принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= i_{\text{ж}}(\underline{Z}_{\text{ж}} + \underline{Z}_{\text{н}}) - i_{\text{э}}\underline{Z}_{\text{м}} + i_{\text{э}}R_{\text{э}\Sigma}, \\ 0 &= -i_{\text{э}}\underline{Z}_{\text{э}} - i_{\text{ж}}\underline{Z}_{\text{м}} + i_{\text{э}}, \end{aligned}$$

где $\underline{Z}_{\text{ж}} = R_{\text{ж}} + j\omega L_{\text{ж}}$ - полное сопротивление жилы кабеля; $\underline{Z}_{\text{э}} = R_{\text{э}} + j\omega L_{\text{э}}$ - полное сопротивление экрана кабеля; $\underline{Z}_{\text{м}}$ - сопротивление взаимной индукции между двумя параллельными линиями “провод-земля”; $\underline{Z}_{\text{н}}$ - полное сопротивление нагрузки; $R_{\text{э}\Sigma} = R'_{\text{э}} + 2R_{\text{эз}} = R_{\text{э}} \cdot \ell + 2R_{\text{эз}}$, $R_{\text{эз}}$ - сопротивление земляного канала с учетом заземлителей.

Для КЛ напряжением 110 кВ и выше уравнения электрического состояния уравнения электрического состояния схемы на рис. б принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= i_{\text{ж}}\underline{Z}_{\text{ж}} - i_{\text{э}}\underline{Z}_{\text{м}} + i_{\text{э}}R_{\text{э}\Sigma} + \dot{U}_2, \\ 0 &= -i_{\text{э}}\underline{Z}_{\text{э}} - i_{\text{ж}}\underline{Z}_{\text{м}} + i_{\text{э}}R_{\text{э}\Sigma}, \end{aligned}$$

где $\dot{U}_2 = i_{\text{ж}} \cdot \frac{[\underline{Z}_{\text{н}} \cdot (-0,5jX_c)]}{[\underline{Z}_{\text{н}} - 0,5jX_c]}$.

Падение напряжения на токопроводящей жиле, “земле” и экране кабеля с учетом принятых на рис. 6 условных положительных направлений токов и напряжений представим в виде

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{\text{ж}} &= \dot{I}_{\text{ж}} R_{\text{ж}} + j \dot{I}_{\text{ж}} X_{\text{ж}} - j \dot{I}_{\text{э}} X_{\text{жэ}}, \\ \Delta \dot{U}_{\text{э}} &= \dot{I}_{\text{э}} R_{\text{э}} + j \dot{I}_{\text{э}} X_{\text{э}} - j \dot{I}_{\text{ж}} X_{\text{жэ}} = \dot{I}_{\text{ж}} R_{\text{ж}} - \dot{I}_{\text{э}} (R_{\text{э}} - j X_{\text{м}}), \\ \Delta \dot{U}_{\text{з}} &= \dot{I}_{\text{з}} R_{\text{з}\Sigma} = \dot{I}_{\text{з}} \cdot (R'_{\text{з}} + 2R_{\text{зз}}).\end{aligned}$$

С учетом вышеизложенного выражение падения напряжения на экране кабеля, при условии равенства реактивных сопротивлений экрана и взаимоиנדукции $X_{\text{э}} = X_{\text{жэ}} = X_{\text{м}}$, принимает вид

$$\Delta \dot{U}_{\text{э}} = \dot{I}_{\text{э}} R_{\text{э}} + j X_{\text{м}} (\dot{I}_{\text{э}} - \dot{I}_{\text{ж}}) = \dot{I}_{\text{ж}} R_{\text{э}} - \dot{I}_{\text{э}} (R_{\text{э}} - j X_{\text{м}}) = \dot{I}_{\text{э}} R_{\text{э}} + j X_{\text{м}} \dot{I}_{\text{з}}.$$

Поскольку для параллельно включенных ветвей (рис. 6) выполняется условие $\Delta \dot{U}_{\text{э}} = \Delta \dot{U}_{\text{з}}$, то из равенства

$$\dot{I}_{\text{ж}} R_{\text{э}} - \dot{I}_{\text{э}} (R_{\text{э}} - j X_{\text{м}}) = \dot{I}_{\text{з}} (R'_{\text{з}} + 2R_{\text{зз}})$$

получим выражение для расчета тока в “земляном канале”:

$$\dot{I}_{\text{з}} = \dot{I}_{\text{ж}} \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R'_{\text{з}} + 2R_{\text{зз}} - j X_{\text{м}}} = \dot{I}_{\text{ж}} \cdot \dot{k},$$

$$\text{где } \dot{k} = \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R'_{\text{з}} + 2R_{\text{зз}} - j X_{\text{м}}} = \frac{R_{\text{э}}}{\sqrt{(R_{\text{э}} + R_{\text{з}\Sigma})^2 + X_{\text{м}}^2}} e^{j\varphi_k} = |k| e^{j\varphi_k}.$$

Тогда выражение для тока “земли” можно представить в виде

$$\dot{I}_{\text{з}} = I_{\text{ж}} |k| e^{j(\varphi_{\text{ж}} + \varphi_k)} = I_{\text{з}} e^{j\varphi_{\text{з}}}.$$

Полученные значения можно использовать для вычисления тока “земли” и экрана без вычисления фазовых сдвигов.

Таким образом, ток в “земляном канале” в случае заземления экрана однофазного кабеля с обоих концов, при использовании конкретной марки кабеля с СПЭ-изоляцией, можно определить по известному току жилы и активным сопротивлениям экрана, заземлителей, земли и реактивному сопротивлению индуктивности экрана. При этом предельно допустимый ток жилы следует приравнять предельно допустимому току экрана.

Потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока характеризуются дополнительным сопротивлением $R_{\text{з}}$, определяемым приближенным соотношением

$$R_{\text{з}} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \text{ Ом/км}.$$

На промышленной частоте $f = 50 \text{ Гц}$ удельное сопротивление земли R_z равно, $0,05 \text{ Ом/км}$, что свидетельствует о практическом постоянстве потерь активной мощности в земле при заданной частоте.

Сечение экрана однофазного силового кабеля с СПЭ-изоляцией напряжением 6...35 кВ выполняется от 16 до 35 мм², при этом погонное активное сопротивление медного экрана изменяется в диапазоне от 1,125 до 0,5143 Ом/км.

С учетом значения удельного (километрического) сопротивления “земли”, равного, по приближенным оценкам, $0,05 \text{ Ом/км}$, убеждаемся, что в этом случае ток в земляном канале значительно меньше тока жилы кабеля и составляет единицы процентов от тока жилы. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты расчета тока в земляном канале для кабеля марки ПвПнг(А)-НФ-10 с СПЭ-изоляцией на напряжение 10 кВ с сечением экрана 16, 25 и 35 мм². При расчете длительно допустимый ток жилы принят равным длительно допустимому току экрана заданного сечения.

Расчетные значения действующего значения тока “земли” и его начальной фазы в функции тока жилы и сопротивления заземлителей приведены в табл. 2.

Таблица 1

Расчетные значения тока “земли” в долях тока жилы кабеля

Марка кабеля	Активное сопротивление экрана, $R_{0э}$	Ток жилы	Ток экрана	Размер, d	Индуктивность экрана, $L_э$	Сопротивление взаимной индукции	Протяженность кабельной линии, l	Сопротивление заземлителей	Ток “земли”
	Ом/км	A	A	мм	Гн/км	Ом/км	км	Ом	A
ПвПнг(А)-НФ-10 – 70(16)	1,125	120	120	8,12	$23,308 \cdot 10^{-4}$	0,732239	1,0	4 (2)	15/25,83
ПвПнг(А)-НФ-10 – 150(25)	0,72	140	140	10,39	$22,83 \cdot 10^{-4}$	0,7172	1,0	4 (2)	11,45/20,9
ПвПнг(А)-НФ-10 – 300(35)	0,5143	170	170	13,172	$22,34 \cdot 10^{-4}$	0,7018	1,0	4 (2)	10,17/15,6

Таблица 2

Расчетные значения модуля и аргумента тока земли

Марка кабеля	Ток жилы	Сопротивление заземлителей	Значения модуля, $ k $ при $l=1$ км	“Ток земли”	Ток земли, в % тока жилы	Фаза тока “земли”
	A	$Ом$	отн. ед.	A	%	эл. град
ПвПнг(А)-НГ-10 – 70(16)	120	2 (4)	0,215 (0,122)	25,83 / 15	21,5 / 12,5	8,05° / 4,56°
ПвПнг(А)-НГ-10 – 150(25)	140	2(4)	0,149 (0,082)	20,9 / 11,45	14,9 / 8,17	8,94° / 4,67°
ПвПнг(А)-НГ-10 – 300(35)	170	2(4)	0,151 (0,0598)	15,6 / 10,17	11,1 / 5,98	8,55° / 4,67°

Наличие реактивного сопротивления взаимной индукции вносит дополнительный фазовый сдвиг тока “земли”, что в конечном итоге приводит к изменению коэффициента мощности линии. Например, при сечении экрана кабеля 16 мм^2 и значении сопротивления заземлителя 8 Ом вектор тока “земли” будет повернут примерно на 5 эл. град. относительно вектора тока жилы:

$$I_3 = I_{\text{ж}} \frac{R_3}{R_3 + R_3 + 2R_{33} - jX_m} = I_{\text{ж}} \frac{1,125}{1,125 + 0,05 + 8 - j0,732} = 0,125 \cdot I_{\text{ж}} e^{j4,56^\circ}.$$

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что с увеличением сечения экрана ток “земляного канала” уменьшается пропорционально, но абсолютное значение этого тока существенно зависит от сопротивления заземлителя. Следует отметить, что начальная фаза тока “земли” при указанном сопротивлении заземлителей практически не зависит от сечения экрана, что свидетельствует о постоянстве фазы тока в экране. Если начальную фазу тока жилы принять равной нулю, то с учетом фазы тока “земли” фаза тока в экране составит несколько электрических градусов. Поэтому в инженерных расчетах однофазных кабельных линий с СПЭ-изоляцией фазовые сдвиги токов экрана и “земли” можно не учитывать.

При определении потерь активной мощности в кабельных линиях с СПЭ-изоляцией с двусторонним заземлением экрана можно не учитывать потери в изоляции из-за малого значения угла диэлектрических потерь.

Потери активной мощности в жиле, “земле” и экране однофазной кабельной линии с двусторонним заземлением экрана равны

$$\Delta P_{1\text{к}} = I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}} + I_3^2 R_3 + I_3^2 R_{3\Sigma}.$$

При равенстве токов жилы и экрана однофазного кабеля и с учетом выражения для тока “земли” получим соотношение для расчета суммарных потерь активной мощности, распределение которой по участкам кабельной линии при предельном токе экрана приведено в табл. 3:

$$\Delta P_{1к} = I_{ж}^2(R_{ж} + R_{э} + |k|^2 R_{3\Sigma}).$$

Таблица 3

Потери мощности в кабельной линии электропередачи при $R_{33} = 2 \text{ Ом}$

Марка кабеля	Протяженность кабельной линии, l	Удельное активное сопротивление жилы, $R_{0ж}$	Удельное активное сопротивление экрана, $R_{0э}$	Суммарное сопротивление “земли”, $R_{3\Sigma}$	Потери активной мощности		
					жила	экран	“земля”
					кВт		
ПвПнг(А)-НФ-10 – 70(16)	1,0	0,2571	1,125	4,05	3,703	16,2	2,696
ПвПнг(А)-НФ-10 – 150(25)	1,0	0,12	0,72	4,05	1,728	10,368	1,7623
ПвПнг(А)-НФ-10 – 300(35)	1,0	0,06	0,5143	4,05	0,864	7,405	2,669

При одностороннем заземлении кабеля (например, со стороны источника питания) перенапряжение на экране, с учетом равенства токов жилы и экрана, можно рассчитать по соотношению

$$\Delta \dot{U}_э = \dot{I}_ж R_э + j \dot{I}_ж X_э - j \dot{I}_ж X_{жэ} = \dot{I}_ж (R_ж + R_э - j X_м).$$

Значение реактивного сопротивления взаимной индукции кабеля с СПЗ-изоляцией, как это следует из табл. 1, слабо зависит от сечения жилы и экрана кабеля, поэтому максимальное значение напряжения экран-земля в конце линии будет наблюдаться для кабелей с минимальным сечением экрана. Например, для кабеля ПвПнг(А)-НФ-10 – 70(16) с учетом данных табл. 1 получим $\Delta \dot{U}_э = 187,698 e^{j27,9^\circ} \text{ В}$.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что выполнение однофазной двухпроводной линии электропередачи с проводами разного сечения вследствие увеличения потерь электроэнергии нецелесообразно, поскольку при использовании однофазного кабеля с СПЗ-изоляцией для передачи электроэнергии

в однофазной сети ухудшаются показатели энергоэффективности и энергосбережения. Кроме того, заземление экрана кабеля с СПЭ-изоляцией во избежание появления опасных перенапряжений необходимо выполнять с двух концов линии. При этом правильным решением является построение однофазной КЛ двумя кабелями с СПЭ-изоляцией, в которой можно проводить ряд мероприятий по оптимизации потерь электроэнергии. При этом критериями выбора будут надежность, энергоэффективность и экономичность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52736-2007 “Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электродинамического и термического действия токов короткого замыкания”.
2. Циркуляр Ц02-98 (Э) “О проверке кабелей на возгорание при протекании тока короткого замыкания”.
3. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. -СПб.: Изд-во “НИВА”, 2008. - 104 с.
4. **Герасименко А.А., Федин В.Т.** Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие. - 3-е изд., перераб. – М.: КНОРУС, 2012. – 648 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 18.02.2019.

Ն.Պ. ԲԱՂԻԱՆՍԱՆ, Մ.Ք. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Գ.Պ. ԿՈՒԼԵՄՆԻՉ

ՈՒԺԱՅԻՆ ՄԱԼՈՒԽԻ ԷԿՐԱՆԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄԻ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Դիտարկվում է միաֆազ ուժային էլեկտրական մալուխի էկրանային ռեժիմը կարված պոլիէթիլենի մեկուսացմամբ (ԿՊԷ-մեկուսացմամբ), երբ մալուխային էկրանը հողանցված է երկու ծայրերում: Առաջարկվող համարժեք սխեմայի հիման վրա, հաշվի առնելով հողանցման դիմադրությունները, ստացված են արդյունքներ՝ ստանդարտներ «հողային ալիքում» հոսանքի մեծության որոշման համար: Ներկայացվում են «հողի» հոսանքի մեծության հաշվարկային արժեքները տարբեր էկրանային կտրվածք ունեցող ԿՊԷ-մեկուսացմամբ ուժային մալուխների համար: Կատարվել է միաֆազ, միակողմանի հողանցմամբ ուժային էլեկտրական մալուխի էկրանային գերհզորության գնահատում:

Առանցքային բառեր. մեկ փուլային միացում, ուժային մալուխ, էկրանի ռեժիմ, ջերմային կայունություն, ոչ այրվող մեկուսացում, էկրանի հողանցում, հոսանք, հզորության կորուստ:

N.P. BADALYAN, M.K. BAGHDASARYAN, G.P. KOLESNIK

MODELING THE POWER CABLE SCREEN MODE

The screen mode of a single-phase power cable with XLPE insulation is considered when the cable shield is grounded at both ends. Ratios for the determined current in the "earthen channel" on the basis of the proposed equivalent circuit with regard to the resistance of earthing are obtained. The calculated values of the "earth" current for cables with the XLPE insulation with different screen sections are given. An overvoltage evaluation is performed on the cable screen with one-sided grounding.

Keywords: single-phase connection, power cable, screen mode, thermal stability, non-burning insulation, shield grounding, power loss.

Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ն.Հ. ՉՈՒԽԱԶՅԱՆ

**«ՄԱԳԼԵՎ» ԳՆԱՑՔԻ ԿԱՆՈՑԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՇՂԹԱՑԻ ՓՈԽԱՐԽՆՄԱՆ ՍԽԵՄԱՆ ԵՎ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ
ՄՈԴԵԼԸ**

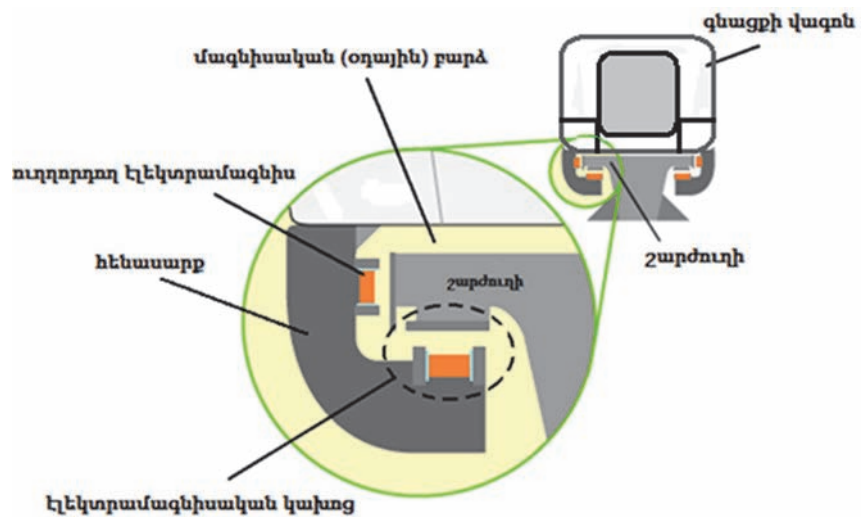
«Մագլև» գնացքի կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելը կազմվել է մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմայի հիման վրա: Միեմայում ցրման մագնիսական հոսքը ներկայացնող զուգահեռ ճյուղերի քանակը որոշվել է ավտոմատացված եղանակով՝ ելնելով խնդրի լուծման ընդունելի ճշգրտությունից: Շղթայի տեղամասերի մագնիսական լարվածությունների արժեքները որոշվել են մագնիսական ինդուկցիայի հայտնի արժեքների միջոցով, նյութի աղյուսակի տեսքով հանձնարարված մագնիսացման կորից՝ այն Լագրանժի 4-րդ կարգի բազմանդամով մոտարկելու ճանապարհով:

Առանցքային բառեր. «մագլև» գնացք, էլեկտրամագնիսական կախոց, մաթեմատիկական մոդել, մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմա, ցրման մագնիսական հոսքի զուգահեռ ճյուղերի քանակ, Լագրանժի բազմանդամ:

«Մագլև» գնացքները շարժուղու նկատմամբ վեր են բարձրացվում էլեկտրամագնիսական կախոցներով և դրա շնորհիվ «ճախրում» են օդային շերտի վրայով: Շարժուղու և գնացքի միջև առաջացած այդ շերտը պայմանականորեն անվանում են «օդային բարձ» կամ «մագնիսական բարձ»: Այս գնացքներն իրենց անվանումը ստացել են “magnetic levitation” բառակապակցությունից, որը թարգմանաբար նշանակում է մագնիսական ճախրանք [1-4]: Նկ. 1-ում պատկերված է «մագլև» գնացքի վազոնը, որին շարժուղուց բաժանում է «մագնիսական բարձը»: Ինչպես տեսնում ենք, էլեկտրամագնիսական կախոցի մագնիսալարը կառավարման փաթույթի հետ միասին տեղադրված է գնացքի հենասարքի վրա, իսկ խարիսխն ամրացված է շարժուղուն (կախոցի կառուցվածքային սխեման և հիմնական չափերը տրված են նկ. 2-ում): Հենասարքին ամրացված է նաև ուղղորդող էլեկտրամագնիսի մագնիսալարը՝ կառավարման փաթույթի հետ միասին, որը նախատեսված է շարժուղու նկատմամբ գնացքի դեպի աջ կամ ձախ շարժումները սահմանափակելու համար:

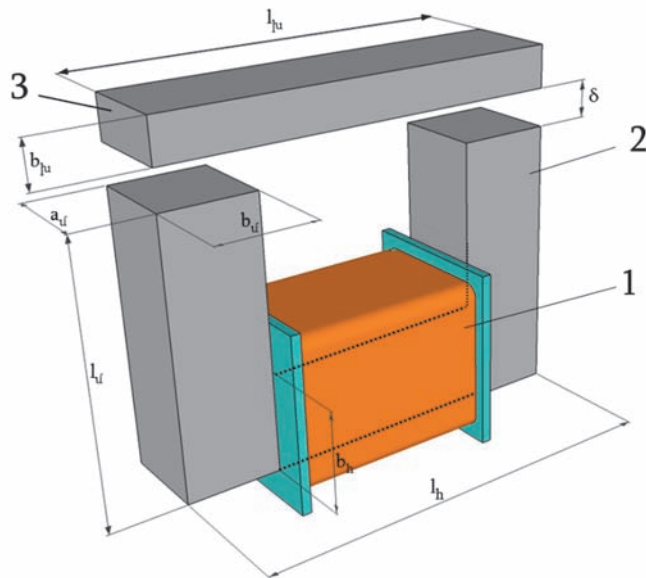
Ինչպես ցանկացած էլեկտրամագնիսական համակարգի, այնպես էլ «մագլև» գնացքների էլեկտրամագնիսական կախոցների ուսումնասիրության, հաշվարկի և նախագծման, այդ թվում՝ ավտոմատացված նախագծման եղանակների մշակման տեսանկյունից կարևոր նշանակություն ունի դիտարկվող համակարգի մաթեմատիկական մոդելը: [4] աշխատությունում կախոցի մաթեմատիկական մոդելը

ստանալու համար կառուցվել է էլեկտրամագնիսական համակարգի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման, որտեղ զուգահեռ տեղադրված միջուկների միջև հոսող և դրանց երկարությամբ բաշխված ցրման մագնիսական հոսքը ներկայացված է երեք զուգահեռ ճյուղերով ու համապատասխան հոսքերով: Իրականում այդ ճյուղերի քանակը կարող է լինել՝ սկսած 0-ից, երբ ցրման հոսքերը անտեսվում են մինչև մեծ քանակությամբ ճյուղեր, երբ մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման հնարավորինս «մոտեցվում» է իրական՝ բաշխված ցրման մագնիսական հոսքով համակարգին՝ էլնելով փոխարինման սխեման կազմող հետազոտողի մասնագիտական փորձից և խնդրի լուծման առանձնահատկություններին [5]:



Նկ.1. «Մագլև» զնացքի վագոնը շարժուղու վրա

Ակնհայտ է, որ բոլոր դեպքերում անհրաժեշտ է առաջնորդվել խնդրի լուծման պահանջվող (բավարար) ճշգրտությունն ապահովելու պայմանով: Այս հողվածում առաջարկվում է զնացքի կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմայում ցրման հոսքերի զուգահեռ ճյուղերի մի ինչ-որ ո քանակի ավտոմատացված որոշման եղանակ՝ ցրման հոսքի հաշվառման հայտարարված (ընդունելի) ճշգրտության պահպանումով:

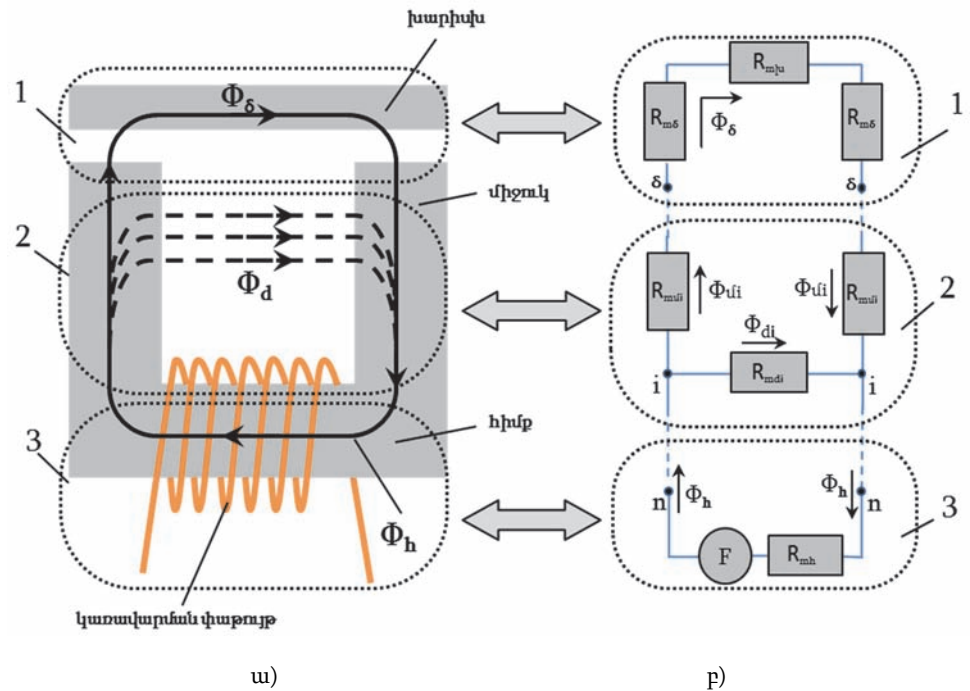


Նկ.2. Էլեկտրամագնիսական կախոցի կառուցվածքային սխեման.

1-կառավարման փաթույթ (տեղադրված է մագնիսալարի հիմքի վրա), 2- միջուկ, 3- խարիսխ,
 l_{hu} – խարսխի երկարությունը, b_{hu} – խարսխի հաստությունը, a_d – միջուկի հաստությունը,
 b_d – միջուկի լայնությունը, l_d – միջուկի երկարությունը, l_h – հիմքի երկարությունը,
 b_h – հիմքի հաստությունը, δ – աշխատանքային օդային բացակների չափերը
 (երկարությունները)

Նկ. 3-ում պատկերված են էլեկտրամագնիսական կախոցի մագնիսական շղթան (ա) և դրա փոխարինման սխեման (բ): Ընդ որում, փոխարինման սխեման պայմանականորեն ներկայացված է երեք (1, 2 և 3) բնութագրական տեղամասերով: Վերին (1-ին) հատվածն ընդգրկում է օդային աշխատանքային բացակներն ու խարիսխը՝ Φ_{δ} մագնիսական հոսքով և խարսխի $R_{m\chi}$ ու օդային բացակների $R_{m\delta}$ մագնիսական դիմադրություններով: Սխեմայի միջին (2-րդ) տեղամասում մագնիսալարի միջուկների միջև հոսում է ցրման հոսքը, որը, ինչպես նշել ենք, սխեմայում կարող է ներկայացվել 0-ից մինչև մի ինչ-որ n քանակությամբ զուգահեռ ճյուղերով: Նկ. 3բ-ի սխեմայի դիտարկվող հատվածում ներկայացվել են ցրման հոսքի ընթացիկ i -րդ զուգահեռ ճյուղը և միջուկների՝ դրան համապատասխանող հատվածները: Այստեղ Φ_{di} -ն միջուկների տվյալ հատվածներով անցնող մագնիսալարի հոսքն է, Φ_{di} -ն՝ ցրման հոսքի i -րդ զուգահեռ ճյուղի հոսքը, R_{mfi} -ն՝ միջուկների համապատասխան հատվածների մագնիսական դիմադրությունը, R_{mdi} -ն՝ ցրման հոսքի i -րդ զուգահեռ ճյուղի մագնիսական դիմադրությունը: Փոխարինման սխեմայի երրորդ՝ ստորին հատվածում, հիմքի մագնիսալարի R_{mh} մագնիսական

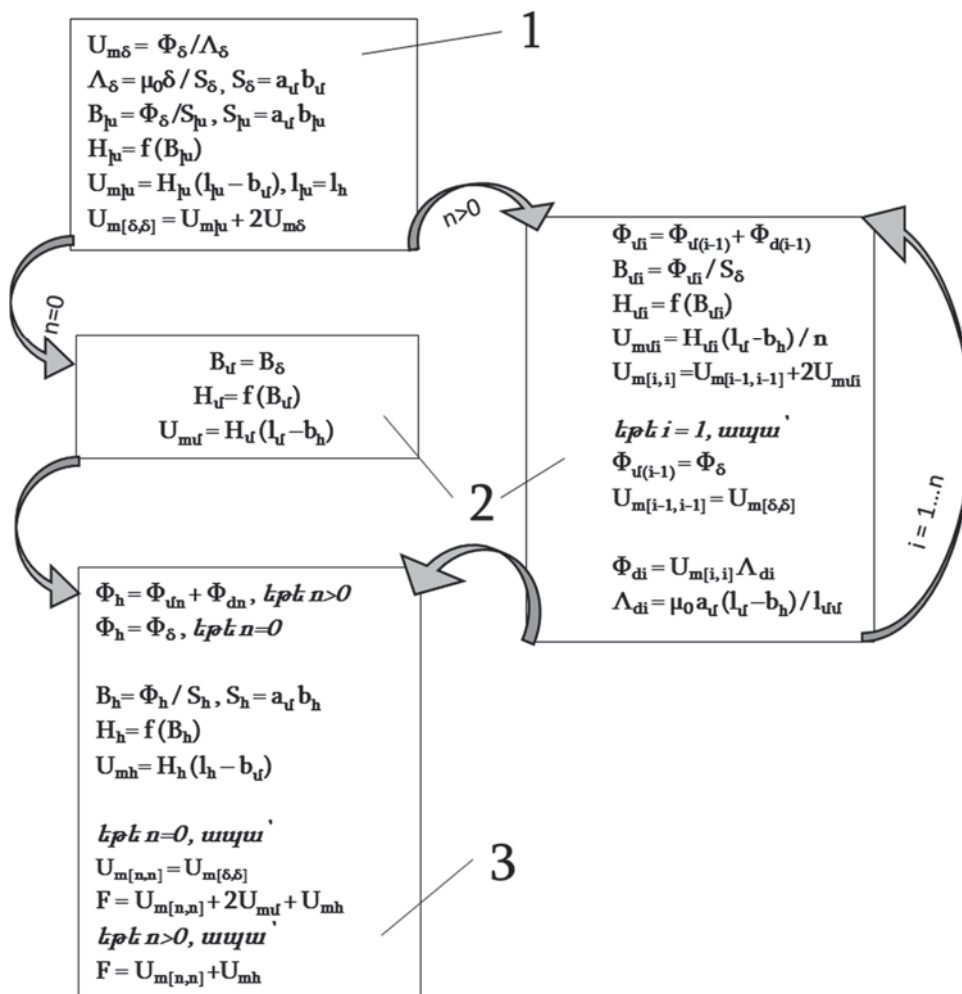
դիմադրությունն է, որով հոսում է հիմքի Φ_h մագնիսական հոսքը, իսկ կառավարման փաթույթի մագնիսաշարժ ուժն ($U\tau\Omega F$) այստեղ նշված է F -ով (նկ. 3 բ):



Նկ.3. Մագնիսական շղթան (ա) և դրա փոխարինման սխեման (բ)

Նկ. 4-ում ներկայացված են մագնիսական շղթան նկարագրող բանաձևերը, որոնք կազմվել են հայտնի մաթեմատիկական արտահայտությունների [4-7] հիման վրա՝ մագնիսական շղթայի ուղիղ խնդրի լուծման հաջորդականությամբ [4-7]: Այս բանաձևերի համախուսմբը կարող է դիտարկվել որպես կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի վերջնականորեն ձևավորված մաթեմատիկական մոդել, եթե որոշվել է ցրման մագնիսական հոսքի զուգահեռ ճյուղերի $n=i$ քանակը:

Նկ.4 -ի բանաձևերը խմբավորված և առանձնացված են 1-3 ուղղանկյուն շրջանակներում, որոնք համապատասխանում են մագնիսական շղթայի 1-3 տեղամասերին:



Նկ. 4. Մագնիսական շղթան նկարագրող մաթեմատիկական արտահայտությունների համախումբը

Այսպես, 1-ին շրջանակում Φ_{δ} -ն մագնիսական հոսքն է օդային բացակում, որի արժեքը հայտնի է դիտարկվող խնդրի լուծման պարագայում. այն կարող է որոշվել բացակում B_{δ} մագնիսական ինդուկցիայի հայտնի (ընտրված) արժեքի միջոցով՝ $\Phi_{\delta} = B_{\delta} S_{\delta}$, S_{δ} -ն օդային բացակի (միջուկի) լայնական հատույթի մակերեսն է, μ_0 -ն՝ վակուումի մագնիսական թափանցելիությունը, Λ_{δ} -ն՝ բացակի մագնիսական հաղորդականությունը, S_{δ} -ն՝ խաբսիի լայնական հատույթի մակերեսը, B_{δ} -ն՝ մագնիսական ինդուկցիան խաբսիում, $U_{m\delta}$ -ն՝ մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունը խաբսիում, $U_{m[\delta,\delta]}$ -ն՝ մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունը շղթայի δ - δ կետերի միջև (նկ. 3 բ): Նշենք, որ այստեղ, ինչպես և ստորև

դիտարկվող դեպքերում, մագնիսական լարվածությունը (տվյալ դեպքում՝ $H_{\parallel}$) որոշվում է էլեկտրամագնիսի մագնիսալարի դիտարկվող տեղամասի նյութի մագնիսացման $B(H)$ կորից [5]՝ ինդուկցիայի հայտնի արժեքով (տվյալ դեպքում՝ $B_{\parallel}$)։ Ի տարբերություն [7] աշխատության, որտեղ նշված խնդրի ավտոմատացված լուծման համար կիրառվում է կտոր-գծային մոտարկման մեթոդը, այստեղ առաջարկվում է լարվածության արժեքը որոշել $B(H)$ -ի Լագրանժի 4-րդ կարգի բազմանդամով մոտարկված $B_4(H)$ տեսքով [8].

$$B_4(H) = \sum_{i=0}^4 \frac{\prod_{j=0}^n (H-H_j)}{\prod_{j=0}^n (H_i-H_j)} B_i, \quad (1)$$

որտեղ H_i -ն մագնիսական լարվածության արժեքն է ինդուկցիայի հայտնի B_i արժեքի դեպքում։ $H_i, B_i, i=1..4$ արժեքները տվյալ նյութի համար տրվում են աղյուսակի տեսքով։

Նկ. 4-ում մագնիսական շղթայի 2-րդ տեղամասը ներկայացված է երկու տարբեր շրջանակներում ամփոփված արտահայտություններով, երբ $n=0$ և $n>0$ ։ Առաջին դեպքում B_i և H_i -ն համապատասխանաբար ինդուկցիան և լարվածությունն են միջուկներում, U_{mi} -ն՝ մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունը միջուկների վրա։ Երկրորդ դեպքում Φ_{di} -ն և $\Phi_{d(i-1)}$ -ը համապատասխանաբար միջուկների i -րդ և $(i-1)$ -րդ հատվածների մագնիսական հոսքերն են, B_{di} -ն և H_{di} -ն՝ համապատասխանաբար ինդուկցիան և լարվածությունը միջուկների i -րդ հատվածներում, Φ_{di} -ն և $\Phi_{d(i-1)}$ -ը՝ ցրման հոսքերը միջուկների համապատասխանաբար i -րդ և $(i-1)$ -րդ հատվածներում, Λ_{di} -ն՝ միջուկների i -րդ հատվածի ցրման հոսքի մագնիսական հաղորդականությունը, U_{mli} -ն, $U_{m[i,i]}$ -ն և $U_{m[i-1,i-1]}$ -ը՝ մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունները համապատասխանաբար միջուկների i -րդ հատվածների վրա և մագնիսական շղթայի $i-i$ կետերի և $(i-1)-(i-1)$ կետերի միջև։

Մագնիսական շղթայի 3-րդ տեղամասին հապատասխանող շրջանակում (նկ. 4) Φ_h -ն, B_h -ն, H_h -ն, U_{mh} -ն համապատասխանաբար մագնիսալարի հոսքը, ինդուկցիան, լարվածությունը և մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունն են հիմքում, $U_{m[n,n]}$ -ը՝ մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունը մագնիսական շղթայի $n-n$ կետերի միջև (երբ $i=n$), F -ը՝ կառավարման փաթույթի ՄՇՈՒ-ն։

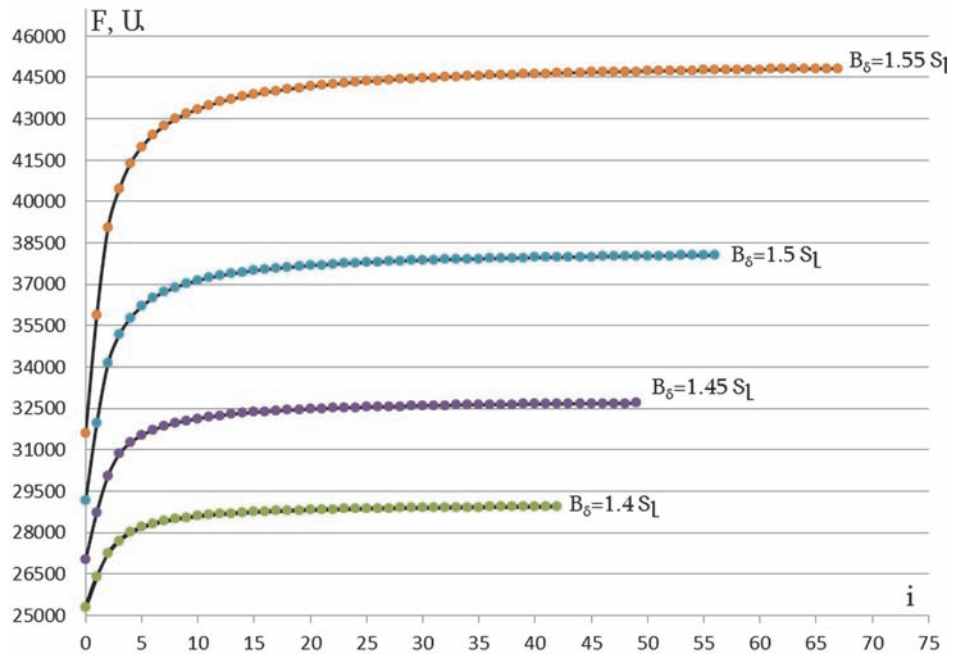
Մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմայում միջուկների միջև ցրման հոսքերի զուգահեռ ճյուղերի ընդունելի քանակը պարզելու և դրանով իսկ դիտարկվող մագնիսական շղթայի ուղիղ խնդիրը լուծելու՝ F ՄՇՈՒ-ի փնտրվող արժեքը որոշելու նպատակով, խնդրի ավտոմատացված լուծման յուրաքանչյուր հերթական քայլում՝ i -ի ընթացիկ արժեքի համար, ստուգվում է հետևյալ պայմանը.

$$\frac{F_i - F_{i-1}}{F_{i-1}} \leq \varepsilon, \quad (2)$$

որտեղ F_i -ն և $F_{(i-1)}$ -ը ՄՇՈՒ-ի հաշվարկված արժեքներն են ցրման հոսքի զուգահեռ ճյուղերի i և $(i-1)$ քանակների համար ($F_i > F_{(i-1)}$), իսկ ε -ը՝ մի ինչ-որ ընտրված թիվ, որն ընդունելի է խնդրի լուծման ճշգրտության տեսանկյունից:

Խնդիրը համարվում է լուծված, երբ հերթական i -ի համար բավարարվում է (2) պայմանը, հայտնի է դառնում ցրման մագնիսական հոսքերի զուգահեռ ճյուղերի քանակը, և վերջնականորեն ձևավորվում է համակարգի մաթեմատիկական մոդելը, F_i -ն ընդունվում է որպես F ՄՇՈՒ-ի հաշվարկային արժեք, իսկ շղթայի մյուս բնութագրական մեծությունների ընթացիկ արժեքները՝ որպես խնդրի լուծման արդյունքներ: Ակնհայտ է, որ որքան փոքր լինի ε -ը, այնքան ավելի ճշգրիտ հաշվառված կլինի շղթայի ցրման հոսքը, և, համապատասխանաբար, այնքան ավելի ճշգրիտ կլինի խնդրի լուծումը: Սակայն նկատի ունենալով, որ դիտարկվող խնդրի լուծման յուրաքանչյուր ընթացիկ քայլում i -ի հերթական արժեքի համար ավելի ու ավելի է փոքրանում $F_i - F_{(i-1)}$ տարբերությունը, տրամաբանական է ընտրել ε -ի մի ինչ-որ ընդունելի արժեք և դրանով իսկ սահմանափակել զուգահեռ ճյուղերի n քանակը:

Նկ. 5-ում, որպես օրինակ, պատկերված են F ՄՇՈՒ-ի արժեքի հաշվարկային կախվածությունները ցրման հոսքի զուգահեռ ճյուղերի քանակից՝ $\delta=0,01$ Մ, $l_{\text{մ}}=0,48$ Մ, $b_{\text{մ}}=0,12$ Մ, $a_{\text{մ}}=0,14$ Մ, $b_{\text{մ}}=0,14$ Մ, $l_{\text{մ}}=0,56$ Մ, $l_{\text{հ}}=0,48$ Մ, $b_{\text{հ}}=0,16$ Մ, $\varepsilon=0,01$ արժեքների, մագնիսալարի «պողպատ 10» նյութի և աշխատանքային օդային բացակում B_s մագնիսական ինդուկցիայի 1,4 ՏՂ, 1,45 ՏՂ, 1,5 ՏՂ, 1,55 ՏՂ արժեքների համար: Ինչպես երևում է գրաֆիկից, ε -ի հանձնարարված արժեքի դեպքում խնդրի լուծումը դադարացվել է ցրման հոսքի զուգահեռ ճյուղերի համապատասխանաբար $n=42, 49, 56, 67$ քանակների դեպքում: Հատկանշական է, որ ճյուղերի քանակի 0-ից մինչև n աճի պարագայում F -ի արժեքը ճշգրտվել և աճել է համապատասխանաբար 14, 20, 30,4 և 41,8 %-ով: Բնականաբար, ճշգրտվել են նաև մագնիսական շղթայի մյուս բնութագրական մեծությունների արժեքները:



Նկ. 5. *F* ՄՇՈՒ-ի հաշվարկային արժեքի կախվածությունները *g*րման հոսքի զուգահեռ ճյուղերի քանակից

Այսպիսով, կախոյի էլեկտրամագնիսական համակարգի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմայում, որի հիման վրա ձևավորվում է համակարգի մաթեմատիկական մոդելը, *g*րման մագնիսական հոսքի զուգահեռ ճյուղերի քանակը որոշվում է ավտոմատացված եղանակով՝ ելնելով խնդրի լուծման համար ընդունելի (հանձնարարված) ճշգրտությունից:

Աշխատանքը կատարվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բաժանի գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Գրիգորյան Ա.Խ., Ապետյան Ն.Ց.** Մագնիսական բարձով արագընթաց գնացքներ // Գիտության աշխարհում. - 2017. - 1.- էջ 58-62:
2. **Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, Ju Lee.** Review of Maglev Train Technologies Korea// IEEE Transactions on Magnetics.- 2006. - Vol. 42, N 7.-P. 1917-1925.
3. **Min Kim, Jae-Hoon Jeong, Jaewon Lim, Chang-Hyun Kim, Mooncheol Won** Design and Control of Levitation and Guidance Systems for a Semi-High-Speed Maglev Train // Journal of Electrical Engineering and Technology.- 2017. - N 12(1). – P. 117-125.

4. **Գրիգորյան Ա.Խ., Ավետիսյան Ա.Գ, Շահբազյան Ա.Ա, Ապետյան Ն.Ց.** Էլեկտրամագնիսական կախոցի ավտոմատացված նախագծման համակարգ //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա. – 2016. - Հ. LXIX, N 3. - էջ 315-325:
5. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов /Под ред. **Ю.К. Розанова**. - 2-е изд., испр. и доп. –М.: Информэлектро, 2001. -420с.
6. **Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шофра В.Н.** Электромеханические аппараты автоматики. –М.: Высшая школа, 1988. -304с
7. **Գրիգորյան Ա.Խ., Աղջոյան Գ.Ա., Մելքոնյան Տ. Ռ., Չուխաջյան Ն.Հ.** Մագնիսական ավարվող կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելավորումը և բնութագրերի որոշումը //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր, Տեխնիկական գիտությունների սերիա. -2017. - Հ. LXX, N 4. - էջ 439-449:
8. **Միմոնյան Ս.Հ.** Հաշվողական մեթոդների կիրառական տեսություն. – Երևան: Ճարտարագետ, 2009. -204 էջ:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.02.2019:

А.Х. ГРИГОРЯН, Н.Г. ЧУХАДЖЯН

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕСА ПОЕЗДА “МАГЛЕВ”

На основе схемы замещения магнитной цепи составлена математическая модель электромагнитной системы подвеса поезда “маглев”. В схеме число параллельных ветвей, представляющих магнитный поток рассеяния, определяется автоматизированным способом, исходя из приемлемой точности решения задачи. По известным значениям магнитной индукции определяются значения магнитной напряженности на отдельных участках цепи путем аппроксимации кривой намагничивания материала, заданной в виде таблицы, многочленом Лагранжа 4-й степени.

Ключевые слова: поезд “маглев”, электромагнитный подвес, математическая модель, схема замещения магнитной цепи, количество параллельных ветвей магнитного потока рассеяния, многочлен Лагранжа.

A.Kh. GRIGORYAN, N.H. CHUKHAJYAN

**THE EQUIVALENT SCHEME OF A MAGNETIC CIRCUIT AND A
MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTROMAGNETIC SYSTEM OF THE
MAGLEV TRAIN SUSPENSION**

The mathematical model of the electromagnetic system of the maglev train suspension is developed on the basis of the magnetic circuit equivalent scheme. The number of parallel branches in the scheme, representing the scattering magnetic flux between the system's cores is determined automatically based on the acceptable accuracy of the solution of the problem. The values of magnetic intensity in certain parts of the circuit are determined by approximating the material magnetization curve. The approximation is carried out by the Lagrange polynomial of the 4th degree by using the known values of magnetic induction which are given in the form of a table.

Keywords: maglev train, electromagnetic suspension, mathematical model, magnetic circuit equivalent scheme, the number of parallel branches of the magnetic flux of dispersion, Lagrange polynomial.

Տ.Ս. ԳՆՈՒՆԻ, Մ.Լ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

**ԷՆԵՐԳԵՏԻ ԿՈՐՈՒՍՏԵՐԻ ԵՎ ՆԵՐԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ
ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ ՄԿՁԲՈՒՆՔԸ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐՈՒՄ**

Ճշտվել են հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության մեծությունները օդային և մալուխային գծերի համար: Որպես նորույթ որոշված է օպտիմալ հարաբերակցության պայմանը էներգիայի կորուստների և ներդրումների միջև: Արտածված են անհամեմատ պարզ բանաձևեր տարեկան նվազագույն ծախսերի և էներգիայի կորուստների հաշվարկների համար, որոնք կարող են կիրառվել գծերի կառուցման նախաներդրումային հետազոտություններում:

Առանցքային բառեր. կապիտալ ներդրումներ, էներգիայի կորուստներ, տնտեսապես շահավետ հատույթներ, նվազագույն ծախսեր:

1. Տարեկան բերված ծախսերի նպատակային ֆունկցիան. Ինչպես հայտնի է [1-3], էլեկտրահաղորդման գծերի կառուցման տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները կախված են դրանց հաղորդալարերի հատույթների և լարումների մեծություններից: Իր հերթին հաղորդալարի հատույթը որոշվում է ըստ հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության՝ օդային և մալուխային գծերի համար: Նախ պետք է ճշտել հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության նորմատիվ մեծությունները այսօրվա գների պայմաններում, այսինքն՝ գծերի սարքավորումների և էներգիայի կորուստների փոփոխված արժեքների դեպքում:

Հաղորդման գծի հաղորդալարի տնտեսապես շահավետ հատույթի ընտրության ցուցանիշը տարեկան բերված ծախսերի մեծությունն է: Միաժամանակյա կապիտալ ներդրումների դեպքում բերված ծախսերի մեծությունը կունենա հետևյալ տեսքը [2,3].

$$V = K\alpha_{\bar{u}} + E, \quad (1)$$

որտեղ K -ն ներդրումների մեծությունն է՝ կախված գծի հաղորդալարի հատույթից ($\eta\rho a\omega$), $\alpha_{\bar{u}}$ -ն՝ ներդրումների հատուցման նորմատիվ գործակիցը (0,12), E -ն՝ տարեկան շահագործման ծախսերը ($\eta\rho a\omega$):

$$K = AFL + B, \quad (2)$$

$$E = K\alpha_{\omega\omega} + K\alpha_{\omega\omega} + K\alpha_{\omega\omega} + C\Delta W, \quad (3)$$

որտեղ A -ն եռաֆազ հաղորդման գծի միավորի արժեքն է ($\eta\rho a\omega / \omega - \omega^2$), B -ն՝ գծի կառուցման հաստատուն ծախսերը ($\eta\rho a\omega$)՝ անկախ հատույթի մեծությունից

(հենարաններ, մեկուսիչներ, շինմոնտաժային աշխատանքներ), L -ը՝ գծի երկարությունը ($մետր$), F -ը՝ հաղորդալարի հատույթը ($մմ^2$), $\alpha_{աւ}$, α_q , $\alpha_{աշ}$ -ն՝ համապատասխանաբար տարեկան ամորտիզացիայի (0,03), վերանորոգման (0,01), աշխատավարձի (0,01) գործակիցները, ΔW -ն՝ էներգիայի տարեկան կորուստների մեծությունը ($կՎտ\cdot\sigma$), C -ն՝ էներգիայի կորուստների միավորի արժեքը ($21,6 \text{ դր}/կՎտ\cdot\sigma$):

Էներգիայի կորուստների միավորի արժեքը էլեկտրական կայաններից ցանց հաղորդվող էներգիայի միավորի արժեքն է (մուտքային արժեքը) [4]: Ելնելով նրանից, որ տարբեր կայաններից գնվող էլեկտրաէներգիայի միավորի արժեքները տարբեր են, էներգիայի կորուստների միավորի արժեքը կարելի է որոշել միջին կշռային արտահայտությունից [1,2].

$$C = \sum_{i=1}^n W_i C_i / \sum_{i=1}^n W_i, \quad (4)$$

որտեղ W_i -ն i -րդ կայանից հաղորդվող էներգիայի քանակն է, C_i -ն՝ i -րդ կայանից հաղորդվող էներգիայի միավորի արժեքը, n -ը՝ ցանցը սնող կայանների քանակը:

Տարեկան էներգիայի կորուստները հաղորդման գծում՝

$$\Delta W = 3I^2 L \tau / \gamma F \cdot 10^3, \quad (5)$$

$$\tau = (0,124 + T \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760, \quad (6)$$

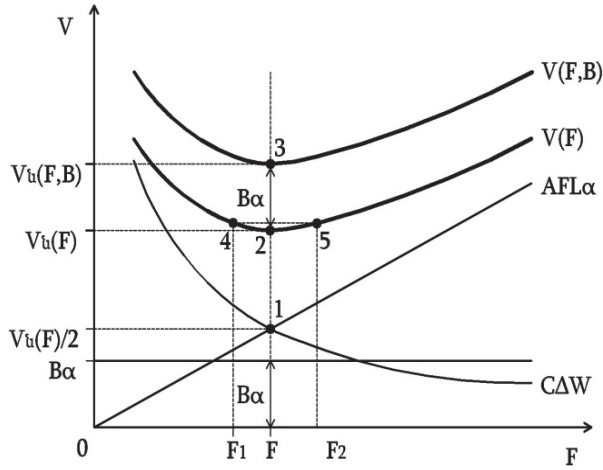
որտեղ I -ն հաղորդման գծով անցնող հաշվարկային հոսանքն է ($Ա$), T -ն՝ հաշվարկային հոսանքի տևողությունը ($\sigmaաւ$), τ -ն՝ առավելագույն կորուստների տևողությունը ($\sigmaաւ$), γ -ն՝ հաղորդալարի տեսակարար հաղորդականությունը (ալյումինի համար $32 \text{ } \sigmaաւ/Օս\cdot մմ^2$):

Տեղադրելով (2), (3) և (5) արտահայտությունները (1)-ի մեջ, կստանանք տարեկան բերված ծախսերի ֆունկցիան՝ կախված հատույթի մեծությունից.

$$V = AFL\alpha + 3I^2 CL\tau / \gamma F \cdot 10^3 + B\alpha, \quad (7)$$

որտեղ α -ն հատուցումների և հատկացումների գումարային գործակիցն է (0,17):

Նկարում պատկերված են բերված ծախսերի և նրա բաղադրիչների կորերը՝ կախված հատույթի մեծությունից: Կորերի վրա կետ 1-ը համապատասխանում է կապիտալ ներդրումների տարեկան հատկացումների ($AFL\alpha$) և էներգիայի կորուստների արժեքի ($C\Delta W$) ֆունկցիաների ածանցյալների և դրանց բացարձակ արժեքների հավասարությանը տնտեսապես շահավետ (F) հատույթի դեպքում:



Նկ. Տարեկան ծախսերի կախվածությունը հատույթից

Կետ 2-ը համապատասխանում է տարեկան բերված ծախսերի նվազագույն արժեքին $[V_b(F)]$, իսկ կետ 3-ը՝ նվազագույն ծախսերին՝ հաշվի առնելով հաստատուն բաղադրիչը ($B\alpha$): Կետեր 4-ը և 5-ը համապատասխանաբար պատկանում են բերված ծախսերի մեծություններին F_1 և F_2 մոտակա փոքր և մեծ ստանդարտային հատույթների դեպքում:

Խնդրի լուծման համար [3] պետք է գտնել այն տնտեսապես շահավետ հատույթը, որի դեպքում բերված ծախսերի ֆունկցիան կստանա իր նվազագույն արժեքը: Պարզ է, որ տնտեսապես շահավետ հատույթը պետք է բավարարի երեք անհրաժեշտ պայմանների.

$$F \geq F_{\rho}, \quad F \geq F_{\omega}, \quad F \geq F_{ust}, \quad (8)$$

որտեղ F_{ρ} -ը երկարատև թույլատրելի հոսանքին համապատասխանող հատույթի նվազագույն արժեքն է, F_{ω} -ը՝ պսակաձև երևույթով պայմանավորված նվազագույն հատույթը, F_{ust} -ը՝ հատույթների ստանդարտային մեծությունները:

2. Տնտեսապես շահավետ հատույթի որոշումը. Հաղորդման գծի հաղորդալարի տնտեսապես շահավետ հատույթի որոշման համար բերված ծախսերի նպատակային ֆունկցիան (7) ածանցվում է ըստ հատույթի և հավասարեցվում զրոյի.

$$dV/dF = AL\alpha - 3I^2CL\tau/\gamma F^2 \cdot 10^3 = 0: \quad (9)$$

Այս հավասարումից (9) հետևում է ծախսերի տեսակարար աճերի հավասարությունը, այսինքն՝ հատույթի ընտրության օպտիմալության պայմանը.

$$AL\alpha = 3I^2CL\tau/\gamma F^2 \cdot 10^3, \quad (10)$$

որտեղից տնտեսապես շահավետ հատույթի մեծությունը՝

$$F = I/\sqrt{A\alpha\gamma \cdot 10^3/3C\tau}: \quad (11)$$

Այս արտահայտության (11) հայտարարը հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության մեծությունն է (U/ul^2).

$$J = \sqrt{A\alpha\gamma \cdot 10^3/3C\tau}: \quad (12)$$

Ինչպես հայտնի է [5], տնտեսապես շահավետ հատույթի (11) և տնտեսապես շահավետ խտության (12) արտահայտությունները կիրառվում են $6 \div 400$ կՎ լարումների օդային և $6 \div 35$ կՎ մալուխային գծերի հաշվարկներում, ինչպես նաև 0,4 կՎ օդային և մալուխային գծերում, եթե հաշվարկային հզորության տևողությունը՝ $T \geq 4000$ ժամ է: Այս արտահայտությունները (11), (12) ճիշտ են նաև պղնձե հաղորդալարերի դեպքում [5]:

Այլումինե օդային գծերի միավորի արժեքը $A_1 = 26$ ղր/մ·մմ²; թղթե մեկուսացումով մալուխային գծերինը՝ $A_2 = 50$ ղր/մ·մմ²; ռետինե մեկուսացումով մալուխային գծերինը՝ $A_3 = 60$ ղր/մ·մմ²:

Տեղադրելով A , α , γ և C մեծությունների արժեքները տնտեսապես շահավետ խտության արտահայտության մեջ (12), կստանանք հետևյալ պարզ բանաձևերը.

✓ Օդային գծերի դեպքում՝

$$J_1 = 46,7/\sqrt{\tau}: \quad (13)$$

✓ Թղթե մեկուսացումով մալուխային գծերի դեպքում՝

$$J_2 = 64,8/\sqrt{\tau}: \quad (14)$$

✓ Ռետինե մեկուսացումով մալուխային գծերի դեպքում՝

$$J_3 = 71,0/\sqrt{\tau}: \quad (15)$$

Աղ. 1-ում բերված են հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության արժեքները՝ կախված հաշվարկային հզորության ($T = 3000 \div 6000$ ժ) և առավելագույն կորուստների տևողությունից:

Ինչպես երևում է աղ. 1-ի տվյալներից, հոսանքի ճշտված տնտեսապես շահավետ խտությունների մեծությունները ավելի փոքր են առկա նորմատիվ մեծություններից [1,2]: Պարզ է, որ տնտեսապես շահավետ խտության արժեքների փոքրացումը հանգեցնում է հատույթների մեծացմանը (կապիտալ ներդրումների մեծացմանը), էներգիայի և լարման կորուստների փոքրացմանը:

Հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության մեծությունները

Ալյումինե օդային և մալուխային գծեր	Հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության արժեքները (U/m^2)`							
	կախված հզորության տեղությունից (∂u)							
	$T(\partial u)$	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
	$\tau(\partial u)$	1570	1970	2410	2890	3410	3980	4590
Օդային գծեր	$J_1(U/m^2)$	1,20	1,05	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70
Թղթե մեկուսացումով մալուխային գծեր	$J_2(U/m^2)$	1,65	1,45	1,30	1,20	1,10	1,05	0,95
Ռետինե մեկուսացումով մալուխային գծեր	$J_3(U/m^2)$	1,80	1,60	1,45	1,30	1,20	1,15	1,05

3. Նվազագույն տարեկան բերված ծախսերը. Այստեղ որպես նորույթ դուրս են բերված նվազագույն ծախսերի և էներգիայի կորուստների հաշվարկների անհամեմատ պարզ բանաձևեր, որոնք կարող են կիրառվել գծերի կառուցման նախաերկրամային հետազոտություններում, ելնելով նրանց պարզությունից և քիչ ծախսատարությունից:

Նկարից երևում է, որ տնտեսապես շահավետ հատույթի որոշման օպտիմալության պայմանը (9) համընկնում է կապիտալ ներդրումների հատկացումների փոփոխական բաղադրիչի ($AFL\alpha$) և տարեկան էներգիայի կորուստների արժեքի ($C\Delta W$) ֆունկցիաների տեսակարար աճերի հավասարության պայմանի (10) հետ:

Ապացուցենք, որ խնդրի լուծման օպտիմալության պայմանը համընկնում է վերը նշված երկու ֆունկցիաների հատման կետի հետ (կետ 1), այսինքն՝ տնտեսապես շահավետ հատույթի դեպքում այդ ֆունկցիաների արժեքները հավասար են:

Բազմապատկենք օպտիմալության պայմանի հավասարման (10) երկու կողմերը տնտեսապես շահավետ հատույթի մեծությամբ.

$$AFL\alpha = 3I^2CL\tau/\gamma F \cdot 10^3: \quad (16)$$

Այստեղից երևում է, որ տնտեսապես շահավետ հատույթի դեպքում նվազագույն տարեկան բերված ծախսերի մեծությունը կարող է որոշվել ավելի պարզ արտահայտությամբ (նկ., կետ 3).

$$V = 2AFL\alpha + B\alpha, \quad (17)$$

իսկ էներգիայի կորուստների արժեքը՝

$$C\Delta W = AFL\alpha, \quad (18)$$

և որպես հետևություն էներգիայի կորուստների մեծությունը՝

$$\Delta W = AFL\alpha/C \quad [L] = \text{մետր}: \quad (19)$$

Պետք է նշել, որ բերված օպտիմալ հարաբերակցության արտահայտությունը (18) ճիշտ է միայն էլեկտրահաղորդման գծի տնտեսապես շահավետ հատույթի դեպքում (նկ.):

Տեղադրելով A , α և C գործակիցների արժեքները էներգիայի կորուստների արտահայտության մեջ (19), կստանանք հետևյալ պարզ բանաձևերը.

✓ Օդային գծերի դեպքում՝

$$\Delta W_1 = 0,20 \cdot FL: \quad (20)$$

✓ Թղթե մեկուսացումով մալուխային գծերի դեպքում՝

$$\Delta W_2 = 0,39 \cdot FL: \quad (21)$$

✓ Ռետինե մեկուսացումով մալուխային գծերի դեպքում՝

$$\Delta W_3 = 0,47 \cdot FL: \quad (22)$$

4. Հաղորդման գծի առավելագույն երկարությունը. Գործնականում ընդունված է էներգիայի կորուստների մեծությունն արտահայտել տոկոսներով հաղորդվող էներգիայի մեծությունից ($W = P \cdot T$, որտեղ P -ն հաշվարկային հզորությունն է):

Հիմնվելով էներգիայի կորուստների արտահայտության (19) վրա, արտահայտենք էներգիայի կորուստների բանաձևը տոկոսներով՝ կախված գծի երկարությունից, լարումից և տնտեսապես շահավետ խտությունից.

$$\Delta W\% = 100 \cdot \Delta W / W = 100 \cdot AFL\alpha / CPT, \quad (23)$$

$$F = I/J = P/\sqrt{3}UJ \cos \varphi, \quad (24)$$

որտեղ $\cos \varphi$ -ն հզորության գործակիցն է (0.85):

Տեղադրելով (24)-ը (23) արտահայտության մեջ և ընդունելով $\cos \varphi = 0,85$, $C = 21,6 \text{ ղր/կՎտ}\cdot\text{ժ}$ և $\alpha = 0,17$, կստանանք՝

$$\Delta W\% = 0,53 \cdot AL / UJT: \quad (25)$$

Գծի առավելագույն երկարությունը (մետր) էներգիայի կորուստների սահմանափակման դեպքում ($\Delta W\% = 5\%$) կլինի հետևյալը.

$$L = \Delta W\% \cdot UJT / 0,53 \cdot A = 9,43 \cdot UJT / A: \quad (26)$$

Այժմ, որպես օրինակ, որոշենք առավելագույն երկարությունները $6 \div 400 \text{ կՎ}$ լարումների օդային և $6 \div 10 \text{ կՎ}$ մալուխային գծերի համար:

✓ Օդային գծի դեպքում ($A_1 = 26 \text{ ՊՐ/մ} \cdot \text{մմ}^2$)՝

$$L_1 = 0,36 \cdot UJ_1T: \quad (27)$$

✓ Թղթե մեկուսացումով մալուխային գծի դեպքում ($A_2 = 50 \text{ ՊՐ/մ} \cdot \text{մմ}^2$)՝

$$L_2 = 0,19 \cdot UJ_2T: \quad (28)$$

✓ Ռետինե մեկուսացումով մալուխային գծի դեպքում ($A_3 = 60 \text{ ՊՐ/մ} \cdot \text{մմ}^2$)՝

$$L_3 = 0,16 \cdot UJ_3T: \quad (29)$$

Վերը նշված արտահայտությունները (26)-(29) կապ են հաստատում հաղորդման գծերի լարումների և նրանց առավելագույն երկարությունների միջև՝ կախված էներգիայի կորուստների նախնական սահմանափակման պայմանից:

Աղ. 2-ում բերված են հաղորդման գծերի առավելագույն երկարությունները (l_u)՝ կախված լարումից, հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտությունից և հաշվարկային հզորության տևողությունից:

Աղյուսակ 2

Հաղորդման գծերի առավելագույն երկարությունները

Հաղորդման գծերի տեսակները	Գծի առավելագույն երկարությունը՝ կախված լարումից ($\Delta W\% = 5\%$ արժեքի դեպքում)			
	U	J	T	L
	կՎ	Ա/մմ^2	ժամ	կմ
Ալյումինե օդային գծեր	6	1,20÷0,70	3000÷6000	8,0÷9,0
	10	1,20÷0,70	3000÷6000	13÷15
	35	1,20÷0,70	3000÷6000	45÷53
	110	1,20÷0,70	3000÷6000	145÷165
	220	1,20÷0,70	3000÷6000	285÷335
	400	1,20÷0,70	3000÷6000	520÷605
Ալյումինե մալուխային գծեր՝ թղթե մեկուսացումով	6	1,65÷0,95	3000÷6000	5,5÷6,5
	10	1,65÷0,95	3000÷6000	9,5÷11
Ալյումինե մալուխային գծեր՝ ռետինե մեկուսացումով	6	1,80÷1,05	3000÷6000	5,0÷6,0
	10	1,80÷1,05	3000÷6000	8,5÷10

5. Ստանդարտային հատույթների ընտրությունը. Նկարում բերված ծախսերի կորերից երևում է, որ բերված ծախսերի գումարային ֆունկցիան ոչ սիմետրիկ պարաբոլ է: Այս պատճառով տնտեսապես շահավետ հատույթից (F) նույն հեռավորության փոքր և մեծ ստանդարտային հատույթների դեպքում ծախսերը հավասար չեն:

Պարզ է, որ փոքր և մեծ ստանդարտային հատույթների միջին թվաբանականը չի կարող լինել ստանդարտային հատույթի ընտրության ցուցանիշ: Ստանդարտային տնտեսապես շահավետ հատույթի ընտրության ցուցանիշը գտնելու համար դիտարկենք $V_1(F_1)$ և $V_2(F_2)$ ծախսերի մեծությունների հավասարության պայմանը.

$$AF_1L\alpha + 3I^2CL\tau/\gamma F_1 \cdot 10^3 = AF_2L\alpha + 3I^2CL\tau/\gamma F_2 \cdot 10^3, \quad (30)$$

որտեղ F_1 -ը և F_2 -ը տնտեսապես շահավետ (F) հատույթին մոտակա փոքր և մեծ ստանդարտային հատույթներն են ($\mathcal{U}^2$):

Բաժանելով (30) հավասարման երկու կողմերը $AL\alpha$ -ի վրա, կստանանք՝

$$F_1 + 3I^2C\tau/A\alpha\gamma F_1 \cdot 10^3 = F_2 + 3I^2C\tau/A\alpha\gamma F_2 \cdot 10^3: \quad (31)$$

Տնտեսապես շահավետ հատույթի բանաձևից երևում է, որ

$$3I^2C\tau/A\alpha\gamma \cdot 10^3 = F^2: \quad (32)$$

Տեղադրելով (32)-ը (31) հավասարման մեջ, կստանանք՝

$$F_1 + F^2/F_1 = F_2 + F^2/F_2, \quad (33)$$

$$F^2(F_2 - F_1)/F_1F_2 = (F_2 - F_1), \quad (34)$$

$$F^2 = F_1F_2, \quad F = \sqrt{F_1F_2}: \quad (35)$$

Այս մեծությունը (35) F_1 և F_2 ստանդարտային հատույթների միջին քառակուսային արժեքն է, որը, իհարկե, փոքր է այդ ստանդարտների միջին թվաբանականից:

- $F < \sqrt{F_1F_2}$, ապա ընտրվում է F_1 փոքր ստանդարտը;
- $F > \sqrt{F_1F_2}$, ապա ընտրվում է F_2 մեծ ստանդարտը;
- $F = \sqrt{F_1F_2}$ ՝ միևնույնն է՝ ստանդարտներից որը ընտրել:

6. Նվազագույն ծախսերի բանաձևի ճշտությունը. Վերը նշվեց, որ նվազագույն ծախսերի բանաձևը (17) ճիշտ է միայն տնտեսապես շահավետ հատույթի դեպքում (11): Պարզ է, որ եթե տնտեսապես շահավետ հատույթից անցնում ենք ստանդարտային փոքր կամ մեծ արժեքներին, ապա տարեկան բերված ծախսերը գերազանցում են նվազագույնին (նկ.):

Ընդունենք $F_{unn} = F \pm \Delta F$ և որոշենք ծախսերի տարբերությունը (աճը) ստանդարտային և տնտեսապես շահավետ հատույթների դեպքում.

$$\Delta V = V(F_{unn}) - V(F), \quad (36)$$

$$\Delta V = AL\alpha(F \pm \Delta F) + 3I^2CL\tau/\gamma(F \pm \Delta F) \cdot 10^3 - 2AF_1L\alpha: \quad (37)$$

Հաշվի առնելով (32) արտահայտությունը՝

$$3I^2C\tau/\gamma \cdot 10^3 = A\alpha F^2, \quad (38)$$

կստանանք՝

$$\Delta V = AL\alpha(F \pm \Delta F) + AL\alpha F^2/(F \pm \Delta F) - 2AFL\alpha, \quad (39)$$

$$\Delta V = AL\alpha[(F \pm \Delta F) + F^2/(F \pm \Delta F) - 2F]: \quad (40)$$

Պարզեցնելով (40) արտահայտությունը, կստանանք.

$$\Delta V = AL\alpha \Delta F^2/F_{\text{ստ}}, \quad (41)$$

իսկ տոկոսներով նվազագույն ծախսերից ($2AFL\alpha$) առանց $B\alpha$ մեծության՝

$$\Delta V\% = 100 \cdot \Delta F^2/2F \cdot F_{\text{ստ}} = 50 \cdot \Delta F^2/F \cdot F_{\text{ստ}}: \quad (42)$$

Դիտարկենք մի շարք թվային օրինակներ, երբ տնտեսապես շահավետ հատույթը հավասար է մոտակա փոքր F_1 և մոտակա մեծ F_2 ստանդարտային հատույթների միջին քառակուսային արժեքին (ΔF մեծության առավելագույն արժեքների դեպքում):

Նվազագույն ծախսերի գնահատման օրինակները բերված են աղ. 3-ում: Աղ. 3-ում բերված արդյունքները նույնն են ինչպես օդային, այնպես էլ մալուխային գծերի դեպքում:

Ինչպես երևում է աղ. 3-ում ներկայացված արդյունքներից, ստանդարտային հատույթներին անցնելու դեպքում նվազագույն ծախսերի բանաձևերի սխալները ($\Delta V_1\%$ և $\Delta V_2\%$) գտնվում են $0,30 \div 1,60\%$ -ի տիրույթում: Սա նշանակում է, որ նվազագույն ծախսերի բանաձևը (17) կարելի է կիրառել հաշվարկներում ոչ միայն տնտեսապես շահավետ, այլև մոտակա ստանդարտային հատույթների դեպքում:

Պարզ է, որ եթե ծախսերի տարբերության ($\Delta V\%$) մեծությունը տոկոսներով որոշենք ոչ միայն փոփոխական ծախսերից ($2AFL\alpha$), այլև հաշվի առնենք ծախսերի հաստատուն բաղադրիչը ($B\alpha$), ապա աղ. 3-ում բերված սխալի տոկոսները կնվազեն:

Տարեկան ծախսերի փոփոխությունը ստանդարտային հատույթներին անցման դեպքում

$F_1,$ $մմ^2$	$F_2,$ $մմ^2$	$F = \sqrt{F_1 F_2},$ $մմ^2$	$\Delta F_1 = F - F_1,$ $մմ^2$	$\Delta V\%(F_1),$ %	$\Delta F_2 = F_2 - F,$ $մմ^2$	$\Delta V\%(F_2),$ %
25	35	29,58	4,58	1,42	5,42	1,42
35	50	41,83	6,83	1,59	8,17	1,59
50	70	59,16	9,16	1,42	10,84	1,42
70	95	81,55	11,55	1,17	13,45	1,17
95	120	106,77	11,77	0,68	13,23	0,68
120	150	134,16	14,16	0,62	15,84	0,62
150	185	166,58	16,58	0,55	18,42	0,55
185	240	210,71	25,71	0,85	29,29	0,85
240	300	268,33	28,33	0,62	31,67	0,62
300	400	346,41	46,41	1,04	53,59	1,04
400	500	447,21	47,21	0,62	52,79	0,62
500	600	547,72	47,72	0,42	52,28	0,42
600	700	648,07	48,07	0,30	51,93	0,30

7. Էներգիայի կորուստների փոփոխությունը՝ կախված ստանդարտային հատույթներից. ըստ (19) արտահայտության՝ էներգիայի կորուստները տնտեսապես շահավետ հատույթի (F) դեպքում որոշվում են $\Delta W = AFL\alpha/C$ բանաձևով:

Պարզ է, որ եթե տնտեսապես շահավետ հատույթից անցնում ենք մոտակա փոքր կամ մեծ ստանդարտային արժեքներին, ապա էներգիայի կորուստների մեծությունը (19) ենթարկվում է փոփոխության $\pm \delta W$ -ի չափով: Ընդունենք $F_{unn} = F \pm \Delta F$ և որոշենք էներգիայի կորուստների տարբերությունը (աճը կամ նվազումը) ստանդարտային և տնտեսապես շահավետ հատույթների դեպքում.

$$\delta W = \Delta W(F_{unn}) - \Delta W(F), \quad (43)$$

$$\delta W = 3I^2 L \tau / \gamma (F \pm \Delta F) \cdot 10^3 - AFL\alpha / C: \quad (44)$$

Հաշվի առնելով (38) արտահայտությունը՝

$$3I^2 \tau / \gamma \cdot 10^3 = A\alpha F^2 / C, \quad (45)$$

և տեղադրելով (45)-ը (44)-ի մեջ, կստանանք.

$$\delta W = AF^2 L \alpha / C (F \pm \Delta F) - AFL\alpha / C: \quad (46)$$

Կատարելով որոշակի ձևափոխություններ, ստանում ենք՝

$$\delta W = \mp AL\alpha F \cdot \Delta F / CF_{unn}, \quad (47)$$

իսկ տոկոսներով էներգիայի կորուստներից տնտեսապես շահավետ հատույթի դեպքում (19).

$$\delta W\% = \mp 100 \cdot \Delta F / F_{un}: \quad (48)$$

Պարզ է, որ փոքր (F_1) ստանդարտի դեպքում կորուստները կաճեն, իսկ մեծ (F_2) ստանդարտի դեպքում կնվազեն:

Եզրակացություն. Օդային և մալուխային գծերի համար ճշտված են հոսանքի տնտեսապես շահավետ խտության մեծությունները՝ հաշվի առնելով հաղորդիչների և էլեկտրաէներգիայի տեսակարար արժեքների փոփոխությունները: Ինչպես երևում է հաշվարկներից, տնտեսապես նպատակահարմար է մեծացնել հաղորդիչների հատույթները, այսինքն՝ մեծացնել էլեկտրահաղորդման գծերի կառուցման կապիտալ ներդրումները, միաժամանակ փոքրացնելով տարեկան էլեկտրական էներգիայի կորուստների արժեքը:

Կապիտալ ներդրումների և էներգիայի կորուստների օպտիմալ հարաբերակցության սկզբունքը հիմնված է տարեկան բերված ծախսերի նվազագույն մեծության վրա, այսինքն՝ համապատասխանում է ծախսերի փոփոխական բաղադրիչների տեսակարար աճերի և նրանց բացարձակ արժեքների հավասարության պայմաններին:

Որպես նորույթ դուրս են բերված պարզ և մատչելի բանաձևեր տարեկան նվազագույն բերված ծախսերի և տարեկան էլեկտրաէներգիայի կորուստների հաշվարկների համար, որոնք կարող են կիրառվել հաղորդման գծերի կառուցման նախաներդրումային հետազոտություններում: Դրանց կիրառությունը ավելի պարզ է, մատչելի և քիչ ծախսատար:

Առաջարկվում են պարզ արտահայտություններ, որոնք կապ են հաստատում հաղորդման գծերի լարումների և նրանց առավելագույն երկարությունների միջև՝ կախված էներգիայի կորուստների նախնական սահմանափակման պայմանից:

Ապացուցված է, որ տնտեսապես շահավետ հատույթից մոտակա փոքր և մեծ ստանդարտներին անցնելիս որպես ցուցանիշ պետք է կիրառել ստանդարտային հատույթների միջին քառակուսային արժեքը՝ միջին թվաբանականի փոխարեն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Веников В.А.** Электрические системы и сети. -М.: Высшая школа, 1998. -511с.
2. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети. -М.: Энергоатомиздат, 1989. -592с.
3. **Թադևոսյան Հ.Մ., Մանուկյան Պ.Ս., Խաչատրյան Մ.Լ., Մանուկյան Ա.Պ.** Հաղորդման գծերի տնտեսապես շահավետ հատույթների որոշումը // ՀՃԱ Լրաբեր. -2017. -Հ.14, №2. -էջ 219-225:
4. <https://armeniasputnik.am/economy/20181203/15998244/armenia-elektraenergiagin.html>
5. Էլեկտրական էներգիայի հաղորդաբաշխման վերաբերյալ տեխնիկական կանոնակարգ: Հայաստանի Հանրապետության կառավարության որոշում №961, 12 հուլիսի, 2007 թ.

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական ինստիտուտ» ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.01.2019:

Т.С. ГНУНИ, М.Л. ХАЧАТРИАН

ПРИНЦИП ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И ВЛОЖЕНИЙ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Для воздушных и кабельных линий уточнены величины экономической плотности тока. В качестве новизны определено условие оптимального соотношения между потерями энергии и вложениями. Предложены более простые формулы определения минимальных затрат и годовых потерь энергии, которые могут быть применены в прединвестиционных расчетах при сооружении сетей.

Ключевые слова: капитальные вложения, потери энергии, экономические сечения, минимальные затраты.

T.S. GNUNI, M.L. KHACHATRYAN

THE PRINCIPLE OF OPTIMAL CORRELATION OF ENERGY LOSSES AND CAPITAL INVESTMENTS IN TRANSMISSION LINES

For air and cable lines, the values of the economic density of current are specified. As a novelty, the term of optimal correlation between the energy losses and the investments is determined. Simpler formulae of determining the minimal expenses and the annual energy losses are proposed which can be applied in pre-investment calculations during the construction of grids.

Keywords: capital investments, energy losses, economic sections, minimal expenses.

А.М. АРУТЮНЯН

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОПРОВОДОВ С
ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПО СРАВНЕНИЮ С ТОКОПРОВОДАМИ С
ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

Токопроводы с литой и воздушной изоляцией предназначены для электрического соединения электроэнергетического оборудования на электрических станциях и подстанциях в цепях трехфазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц и напряжением до 35 кВ. Первоначальная стоимость токопроводов с воздушной изоляцией на стадии заводского изготовления, ввиду их конструктивных особенностей, несколько ниже стоимости токопроводов с литой изоляцией. Однако на стадиях доставки, монтажа и эксплуатации (обслуживания) затраты на токопроводы с литой изоляцией существенно меньше. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации они не требуют обслуживания, кроме того, по сравнению с токопроводами с воздушной изоляцией, они имеют меньшие габаритные размеры и меньшие потери активной мощности. В результате первоначальные дополнительные инвестиции за короткое время окупаются, и применение токопроводов с литой изоляцией на объектах энергосистемы является экономически более обоснованным.

Ключевые слова: токопровод, литая изоляция, воздушная изоляция, экономия, транспортировка, монтаж, затраты.

Введение. Токопроводы с литой и воздушной изоляцией предназначены для электрического соединения электроэнергетического оборудования на электрических станциях и подстанциях в цепях трехфазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц и напряжением до 35 кВ.

Первоначальная стоимость токопроводов с воздушной изоляцией на стадии заводского изготовления несколько ниже стоимости токопроводов с литой изоляцией (на 5...15%). Однако на стадиях доставки, монтажа и эксплуатации затраты на токопроводы с литой изоляцией существенно меньше, в результате чего и получается общая экономия. Перечень признаков (свойств) [1-3], за счет которых получается экономия при применении токопроводов с литой изоляцией, приведен в табл. 1.

В настоящей статье рассмотрена экономия затрат, получаемая в процессе транспортировки и монтажа токопроводов с литой изоляцией в соответствии с пп.1 и 2 табл. 1.

Таблица 1

Свойства токопроводов с литой изоляцией, за счет которых достигается экономия

№	Свойство	Определение экономии
1	Меньший объем всех линий приводит к меньшим затратам на транспортировку: - ж.д. транспортом, - водным транспортом, - автомобильным транспортом	Рассчитывается объем всех типов токопроводов в условиях доставки с учетом упаковки и условий транспортировки. Далее рассматривается отдельно стоимость доставки вычисленного дополнительного объема линий всеми видами транспорта: - ж.д. транспортом, - перевозкой на барже, - доставкой автотранспортом и т.д.
2	Меньшая стоимость монтажа за счет меньшей занимаемой площади и объема линий	Рассчитываются масса, площадь и объем для линий с воздушной и литой изоляцией. Из нормативов берутся значения стоимости монтажа, которые сравниваются со стоимостью линий.
3	Меньший объем требуемых помещений и требуемых открытых площадок над трансформаторами	Рассчитывается объем токопроводящих линий с литой изоляцией и вычитается объем линий с воздушной изоляцией. Получаемый объем экономии пересчитывается по тарифам капитального строительства.
4	Малая стоимость эксплуатации, отсутствие необходимости в замене деталей и комплектующих за весь срок эксплуатации	В токопроводах с воздушной изоляцией в процессе эксплуатации необходимы: 1) замена изоляторов (имеется система контроля опорных изоляторов, типа УКОИ); 2) периодическая подкраска или покраска корпуса; 3) продувка и поддувка теплым и просушенным воздухом внутренних полостей для ликвидации пыли, грязи, возможного конденсата воды и наледей. Воздух подают осушенный. Поддерживается относительная влажность 30...40%. Эта работа постоянная, требует первоначальных затрат (покупка оборудования) и затрат на эксплуатацию (оплата рабочего труда).
5	Меньшие потери мощности для токопроводов с литой изоляцией	В каталогах указана величина "Удельные потери мощности на 1 м". Далее учитываются длина линий и тариф оплаты электроэнергии и рассчитывается экономия за счет потерь мощности в процессе эксплуатации.

Экономия затрат, получаемая при транспортировке. Для расчета затрат на транспортировку определяется объем оборудования. При этом объем вычисляется с учетом упаковки. Объем оборудования для транспортировки отличается от объема линии в собранном виде.

Согласно требованиям [1] и [2], транспортировка токопроводов с литой и воздушной изоляцией проводится автомобильным, железнодорожным или водным транспортом в соответствии с действующими правилами транспортирования:

- "Правила перевозок грузов", МПС;
- "Технические условия погрузки и крепления грузов";
- "Правила перевозки грузов";
- "Общие специальные правила перевозки грузов";
- "Правила дорожного движения".

Условия транспортировки токопроводов в части воздействия механических факторов должны соответствовать ГОСТ 23216:

- жесткие (Ж) - при транспортировании морем,
- средние (С) - для всех других перевозок.

Таким образом, условия транспортировки в Армению средние (С) – автомобильным видом транспорта.

Средние условия транспортировки предполагают наличие упаковки. С целью уменьшения объема токопроводы с воздушной изоляцией типа ТЭНЕ, состоящие внешне из трех трубчатых корпусов и основания, упаковываются отдельно по частям. Токопроводы ТЭНЕ также содержат три цилиндрических корпуса и основание шириной 3 м, поэтому их разделяют при транспортировке на части для возможности размещения в вагоны и автомобили (рис.).

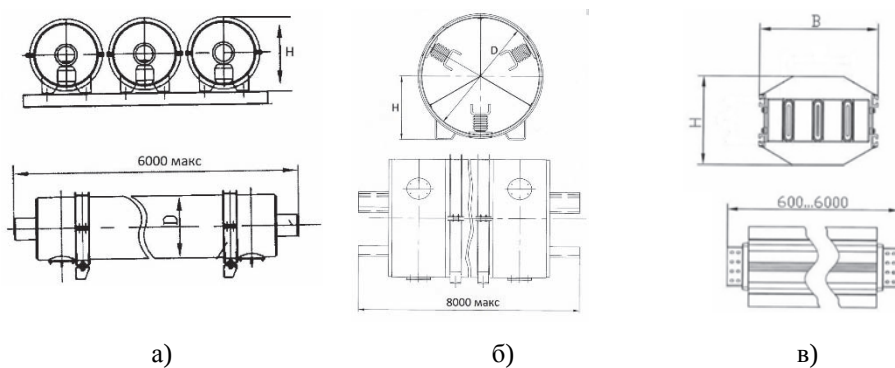


Рис. Токопроводы с воздушной и литой изоляцией: а – ТЭНЕ, б – ТЗКР, в - ТКЛС

В табл. 2 указаны объёмы токопроводов с литой и воздушной изоляцией с учетом условий транспортировки. Для токопроводов с воздушной изоляцией площадь поперечного сечения отдельного цилиндрического корпуса диаметром D рассчитывается не по формуле $\pi(D/2)^2$, а по условиям упаковки $D \times H$. Далее к этому прибавляется 5% для толщины ящиков или же для объема, занимаемого деревянными распорками или другими амортизирующими материалами. Точно так же при расчете объема токопроводов с литой изоляцией учитываются габаритные размеры, и при подсчете сечения прибавляется 5% на место упаковки деревянных или других распорок и амортизирующих материалов.

Таблица 2

Объемы линий токопроводов, предназначенных для транспортировки

Токопроводы с воздушной изоляцией		Токопроводы с литой изоляцией	
тип	внешний диаметр D , габарит с учетом ножек $H1$, сечение $S1$, удельный объем $V1$	тип	габариты $B2$ и $H2$, сечение $S2$, удельный объем $V1$
ТЭНЕ-10- 6000-300 УХЛ1	$D=55$ см, $H1=65$ см, Основание 300×10 см $S1 = (3 \cdot 55 \cdot 65 + 300 \cdot 10) +$ $+5\% = 1,44 \text{ м}^2$, $V1=1,44 \text{ м}^3$	ТКЛС(М)-10- 6000-312 УХЛ1	$B2=59,7$ см, $H2=57$ см $S2 = 59,7 \cdot 57 +$ $+5\% = 0,36 \text{ м}^2$, $V2 = 0,36 \text{ м}^3$
ТЭНЕ-10- 5000-250 УХЛ1	$D=43,2$ см, $H1=44,9$ см. Основание 144×12 см $S1 = (3 \cdot 43,2 \cdot 44,9 + 144 \cdot$ $\cdot 12) + 5\% = 0,79 \text{ м}^2$, $V1=0,79 \text{ м}^3$	ТКЛС(М)-10- 5000-255 УХЛ1	$B2=59,7$ см, $H2=52$ см $S2 = 59,7 \cdot 52 +$ $+5\% = 0,33 \text{ м}^2$, $V2=0,33 \text{ м}^3$
ТЗКР-6- 1600-81 УХЛ1	$D= 62,3$ см, $H1= 67,3$ см $S1 = 62,3 \cdot 67,3 + +5\% = 0,44 \text{ м}^2$, $V1=0,44 \text{ м}^3$	ТКЛС(А)-6- 1600-51 УХЛ1	$B2=59,7$ см, $H2=42$ см $S2 = 59,7 \cdot 42 +$ $+5\% = 0,26 \text{ м}^2$, $V2=0,26 \text{ м}^3$

Из табл. 2 видно, что объём, занимаемый при транспортировке токопроводами с литой изоляцией, меньше объёма, занимаемого токопроводами с воздушной изоляцией.

Экономия затрат на стадии монтажа. Стоимость монтажа токопровода зависит от двух основных факторов:

- массы секций токопровода;
- размеров и объема секций токопровода.

Методика расчета экономии от монтажа включает несколько этапов.

На этапе 1 рассчитываются массы двух видов линий и их отношение K_M .

На этапе 2 находятся реальное сечение линий, пропорциональное объему, и отношение сечений K_C .

Если факторы K_M и K_C больше 1, то значит, масса или объем линии токопровода с воздушной изоляцией больше массы или объема линии токопровода с литой изоляцией. Тогда они складываются, и эффект усиливается. Если же $K_M < 1$, а $K_C > 1$, или наоборот, то эти факторы вычитаются, и вычисляется, какой фактор превалирующий, т.е. главный.

На этапе 3 по расценкам [4] находятся прямые затраты на монтаж токопроводов с воздушной изоляцией.

На этапе 4 по найденному среднему коэффициенту стоимости монтажа линий токопроводов с воздушной изоляцией и разнице факторов K_M и K_C находятся общие затраты на монтаж токопроводов с литой изоляцией.

В табл. 3 и 4 приводятся результаты расчета соответственно удельной массы и удельного объема линий токопроводов с воздушной и литой изоляцией, а также коэффициента массы $K_M = M_1/M_2$.

Как видно из этих таблиц, несмотря на то, что токопроводы с литой изоляцией в основном весят больше, чем с воздушной изоляцией ($K_M < 1$), а их объем значительно меньше, чем объем токопроводов с воздушной изоляцией ($K_C > 1$, $K_C - K_M > 0$), в конечном счете, это приводит к меньшим затратам на монтаж токопроводов с литой изоляцией по сравнению с монтажом токопроводов с воздушной изоляцией.

Таблица 3

Удельная масса токопроводов

Токопроводы с воздушной изоляцией		Токопроводы с литой изоляцией		К _М
тип	удельная масса М1, кг/м	тип	удельная масса М2, кг/м	К _М = М1/М2
ТЭНЕ-10-6000-300УХЛ1	69 - одной фазы, 207 - всех 3-х фаз	ТКЛС(М)-10-6000-312УХЛ1	252,7 - всех 3-х фаз	К _{М1} = 0,819
ТЭНЕ-10-5000-250УХЛ1	46 - на одну фазу, 138 - всех 3-х фаз	ТКЛС(М)-10-5000-255УХЛ1	184,3 - всех 3-х фаз	К _{М2} = 0,749
ТЗКР-6-1600-81УХЛ1	60 - всех 3-х фаз	ТКЛС(А)-6-1600-51УХЛ1	57,3 - всех 3-х фаз	К _{М3} = 1,047

Таблица 4

Удельный объём токопроводов

Токопроводы и шинопроводы с воздушной изоляцией		Токопроводы и шинопроводы с литой изоляцией		К _С
тип	габариты, сечение S1, удельный объём V1	тип	габариты, сечение S2, удельный объём V2	К _С = S1/S2
ТЭНЕ-10-6000-300УХЛ1	D = 55 см Осн. 300 см х 10 см S1 = 3 х 3,14 х 27,5 ² + 300 х х 10 = 1,01 м ² V1 = 1,01 м ³	ТКЛС(М)-10-6000-312УХЛ1	59,7 см х 57 см S2 = 0,34 м ² V2 = 0,34 м ³	К _{С1} = 2,97
ТЭНЕ-10-5000-250УХЛ1	D = 43,2 см Осн. 300 см х 10 см S1 = 3 х 3,14 х 21,6 ² + 300 х х 10 = 0,74 м ² V1 = 0,74 м ³	ТКЛС(М)-10-5000-255УХЛ1	59,7 см х 52 см S2 = 0,31 м ² V2 = 0,31 м ³	К _{С2} = 2,39
ТЗКР-6-1600-81УХЛ1	D = 62,3 см S1 = 3,14 х 31,15 ² = 0,3 м ² V1 = 0,3 м ³	ТКЛС(А)-6-1600-51УХЛ1	59,7 см х 42 см S2 = 0,25 м ² V2 = 0,25 м ³	К _{С3} = 1,2

Пример расчета экономической эффективности применения токопровода с литой изоляцией ТКЛС(М)-10-6000-312 УХЛ1 длиной l = 75 м

Рассматриваемые токопроводы:

Токопровод с литой изоляцией ТКЛС(М)-10-6000-312 УХЛ1

Токопровод с воздушной изоляцией ТЭНЕ-10-6000-300 УХЛ1

Бюджетная стоимость токопроводов с НДС:

ТКЛС(М)-10-6000-312 УХЛ1 – 148 416 руб./м, всего 11 131 200 руб.

ТЭНЕ-10-6000-300 УХЛ1 – 135 582 руб./м, всего 10 168 650 руб.

Затраты на транспортировку

- Транспортировочный объём и масса линий токопроводов:

$$\text{ТКЛС(М)-10-6000-312 УХЛ1} - V_{2m}' = V_{2m} \times l = 0,36 \times 75 = 27 \text{ м}^3 +$$

+ЗИП и комплектующие

$$M_{2'}' = M_2 \times l = 252,7 \times 75 = 19 \text{ т.}$$

Достаточно одной машины

(еврофуры) грузоподъёмностью 20 т.

$$\text{ТЭНЕ-10-6000-300 УХЛ1} - V_{1m}' = V_{1m} \times l = 1,44 \times 75 = 108 \text{ м}^3 + \text{ЗИП}$$

и комплектующие

$$M_{1'}' = M_1 \times l = 207 \times 75 = 15,5 \text{ т.}$$

Нужна одна машина (еврофура)

грузоподъёмностью 20 т и еще одна

машина грузоподъёмностью в 10 т.

Стоимость доставки груза из Москвы до, например, Армянской АЭС машиной грузоподъёмностью 10 т будет порядка 150...200 тыс. руб., в зависимости от сезона. То есть в случае применения токопроводов с воздушной изоляцией только при транспортировке могут возникнуть дополнительные расходы по сравнению с расходами на транспортировку токопроводов с литой изоляцией. В данном примере эти дополнительные расходы составляют 1.5...2% от стоимости самого токопровода с воздушной изоляцией.

Затраты на монтаж

- Объём линий токопроводов при монтаже:

$$\text{ТКЛС(М)-10-6000-312 УХЛ1} - V_{2m}' = V_{2m} \times l = 0,34 \times 75 = 25,5 \text{ м}^3.$$

$$\text{ТЭНЕ-10-6000-300 УХЛ1} - V_{1m}' = V_{1m} \times l = 1,01 \times 75 = 75,75 \text{ м}^3.$$

$$K_C = V_{1m}' / V_{2m}' = 2,97, K_M = M_{1'}' / M_{2'}' = 0,82. K_C - K_M = 2,15.$$

Согласно таблице 8-01-078 [4], прямые затраты на монтаж погонного метра токопровода с воздушной изоляцией будут $3 \times 774,37 = 2323 \text{ руб./м}$, или 1,7% от стоимости токопровода. Так как $K_C - K_M = 2,15$, то затраты на монтаж токопровода с литой изоляцией ожидаются в 2,15 раза меньше затрат на монтаж токопроводов с воздушной изоляцией, т.е. составят $2323/2,15 = 1080 \text{ руб./м}$. Разница затрат на монтаж погонного метра токопроводов будет $2323 - 1080 = 1243 \text{ руб./м}$, или примерно 1% от стоимости токопровода с воздушной изоляцией.

Это значит, что экономия затрат на транспортировку и монтаж при применении токопровода с литой изоляцией получается 2,5...3% от стоимости токопровода с воздушной изоляцией.

Выводы. Несмотря на то, что бюджетная стоимость токопроводов с литой изоляцией изначально на 5...15% выше стоимости токопроводов с

воздушной изоляцией, за счет меньшей стоимости транспортировки и монтажа токопровода с литой изоляцией можно сэкономить затраты на 2,5...3% от стоимости токопровода с воздушной изоляцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические условия ТУ 3414-001-63740123-10. Токопроводы генераторного напряжения / ООО «РТК-Союз». –М, 2010.
2. Технические условия ТУ 3414-002-66892460-2014. Токопроводы комплектные литые типа ТКЛС(А) и ТКЛС(М). ООО «РТК-ЭЛЕКТРО-М». - Павловский Посад, 2016.
3. SuprAI Bridge. Производство токопроводов. Комплектные токопроводы и шинопроводы для объектов энергетики. Техническое описание.
4. Федеральные единичные расценки на монтаж оборудования ФЕРм-2001, Государственные системные нормативы.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.02.2019.

Ա.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՁՈՒԼԱԾՈՒ ՄԵԿՈՒՍՉՈՎ ՀՈՍԱՆՔԱՏԱՐՐԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ ՕԴԱՅԻՆ ՄԵԿՈՒՍՉՈՎ ՀՈՍԱՆՔԱՏԱՐՐԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏ

Օդային և ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարները նախատեսված են էլեկտրականության և էներգիայի և էներգիայի տեղափոխման համար 50 և 60 Հգ հաճախությամբ փոփոխական հոսանքի մինչև 35 կՎ շղթաներում էլեկտրաէներգետիկական սարքավորումների էլեկտրական միացման համար: Օդային մեկուսչով հոսանքատարների սկզբնական արժեքը արտադրման փուլում դրանց կառուցվածքային առանձնահատկությունների պատճառով ավելի ցածր է ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարների արժեքից: Սակայն առաքման, մոնտաժի և շահագործման (սպասարկման) փուլերում կրած ծախսերը ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարների դեպքում զգալիորեն քիչ են: Օրինակ, ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարները շահագործման ընթացքում չեն պահանջում սպասարկում, իսկ օդային մեկուսչով հոսանքատարները պահանջում են պարբերաբար ներկի թարմացում, օդափոխում և մեկուսիչների փոխարինում: Ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարներն ունեն նաև փոքր չափեր, ինչը թույլ է տալիս խնայել հոսանքատարի տեղափոխման և կապիտալ շինարարության համար կատարվող ծախսերում, ունեն ավելի քիչ ակտիվ հզորության կորուստներ, որը թույլ է տալիս խնայել հոսանքատարի ծառայության ողջ ժամկետի ընթացքում: Արդյունքում ստացվում է, որ սկզբնական լրացուցիչ ներդրումները կարճ ժամանակում ետ են գնվում, և ձուլածո մեկուսչով հոսանքատարների կիրառումը էներգահամակարգի տարրերում դառնում տնտեսապես առավել հիմնավորված:

Առանցքային բառեր. հոսանքատար, ձուլածո մեկուսիչ, օդային մեկուսիչ, տնտեսում, տեղափոխում, մոնտաժ, ծախսեր:

A.M. HARUTYUNYAN

**ECONOMIC JUSTIFICATION OF USING A CAST RESIN BUSBAR SYSTEM AS
COMPARED TO AN AIR INSULATED BUS DUCT SYSTEM**

Cast resin and air insulation busbar systems are designed for electrical connections of electrical equipment in power plants and substations in three-phase AC circuit of 50 and 60 Hz and a voltage up to 35 kV. The initial price of the air insulated bus duct system, at the stage of prefabrication, due to its design features, is slightly lower than the price of the cast resin insulated busbar system. However, at the stage of delivery, installation and operation (maintenance) costs for the cast resin insulated busbar system are significantly lower. It is connected with the fact that the cast resin insulated busbar system does not require periodic service during operation. Besides, the cast resin busbar system also has smaller dimensions. As a result, initial additional investments are recouped in a short time, and the use of a cast resin insulated busbar system in power grid facilities is more cost effective.

Keywords: busbar, cast resin insulation, air insulation, economy, transportation, installation, costs.

G.Y. AYVAZYAN, S.K. KHUDAVERDYAN, M.S. LEBEDEV,
A.V. SEMCHENKO

EFFICIENT SURFACE PASSIVATION OF N-TYPE BLACK SILICON

Surface recombination losses significantly reduce the efficiency of black silicon (b-Si) for solar cell applications. Surface passivation using suitable dielectric films can minimize these losses. This paper reports the investigation on the passivation properties of the hafnium dioxide (HfO_2) film deposited on n-type b-Si surface via the atomic layer deposition method. It is shown that in addition to efficient passivation, HfO_2 film reduces the reflectance of the b-Si surface in the wide spectral range.

Keywords: black silicon, solar cell, passivation, reflection, atomic layer deposition, hafnium dioxide.

Introduction. Black silicon (b-Si) or silicon grass is a needle-like surface where needles are made of single-crystal Si and have a height $0.3 \dots 10 \mu\text{m}$ and diameter $0.05 \dots 1.0 \mu\text{m}$. These surfaces can be fabricated by the reactive ion etching (RIE) method, which exhibits some distinct advantages. First, it is a reliable and reproducible, yet self-organized process that does not necessitate any additionally applied mask. Second, the method leaves the crystallographic intact nanostructure surfaces free of chemical contaminations, in contrast, e.g., to structures obtained by wet etching. Third, it cannot only be applied to poly- and monocrystalline wafers, but also to amorphous or crystalline Si thin films.

The unusual optical characteristics make b-Si interesting for solar cell applications as antireflection surfaces [1-4]. This is due to the needles of b-Si that would multi-reflect the incident light and thus reduce the reflectance, leading to an enhancement of absorptance.

Although an especially low surface reflection ratio has been achieved by b-Si, the final energy-conversion efficiency of solar cells is not satisfied at present. The main problems are as follows. The b-Si solar cells suffer from increased surface recombination rates due to the larger surface area resulting in poor spectral response especially at short wavelengths. In addition, the huge internal surface of the needles tends to be progressively oxidized or contaminated by impurities when in contact with air. The only way to overcome these drawbacks is the effective passivation and stabilization of the b-Si surface [5, 6].

Nowadays, some works demonstrate that excellent passivation of b-Si surfaces can be achieved using aluminum oxide (Al_2O_3) films grown via the atomic layer deposition (ALD) method [7-10]. The general advantage of the ALD method

is that it can be used for a large area deposition and processed at a low temperature. With ALD, good film quality, accurate thickness control and conformality are achieved. In particular, ALD Al_2O_3 -passivated b-Si has been used as a material in record breaking solar cells reaching efficiencies above 22.1% [10].

However, an Al_2O_3 passivation film has negative fixed charges, which result in an inversion layer on the n-type Si surface, causing short-circuit current loss due to the parasitic shunting between this inversion layer and metal contact. Therefore, the passivation quality provided by Al_2O_3 on n-type Si surfaces is limited. The dual layer stacks of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ prepared by ALD have both been demonstrated to passivate the n-type b-Si surfaces [11, 12] but a dielectric stack requires separate reactors in production to account for different process temperatures and avoid the risk of cross contamination.

This paper demonstrates the use of ALD hafnium dioxide (HfO_2) films as a novel candidate for n-type b-Si surface passivation. HfO_2 films have positive fixed charges and this makes it very suitable for passivation of n-type Si wafers [13]. ALD HfO_2 was also chosen for investigation due to its higher dielectric constant ($k \sim 25$) than that of the Al_2O_3 film ($k \sim 9$), a large energy band gap ($\sim 5.68 \text{ eV}$) and thermodynamic stability in contact with Si surface [14, 15].

Experimental details. The experiments were performed on double-side polished Czochralski-grown phosphorus-doped Si wafers (100) oriented and of resistivity $3.0 \Omega\cdot\text{cm}$. The wafer thickness was $440 \mu\text{m}$ and the oxygen level was 8.0 ppm .

The b-Si layers on the front surfaces of Si wafers were fabricated by the RIE method in a gas mixture of sulfur hexafluoride (SF_6) and O_2 by the multi-cathode RIE chamber (Fig. 1). The mixture SF_6/O_2 is non-toxic and easy to handle. The process pressure was 55 mTorr and the gas flow rates were $75 \text{ cm}^3/\text{min}$ and $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ for SF_6 and O_2 , respectively. The samples were placed on the water-cooled (23°C) bottom electrode that was powered by a 13.56 MHz RF generator. The etch durations were kept constant at 10 min .

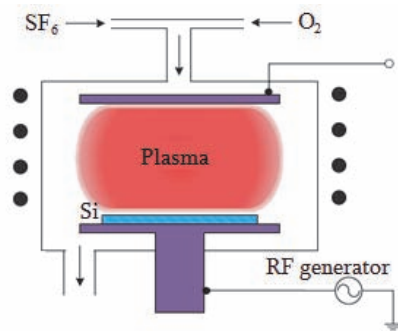


Fig. 1. Schematic view of the RIE chamber

After the RIE process, all samples were previously cleaned using the following sequence of steps: 1) boiling in acetone to remove the presumable surface organic contamination; 2) boiling in the $\text{NH}_3\text{:H}_2\text{O}_2\text{:H}_2\text{O}$ (1:1:7) solution; 3) dipping into the 5% HF solution for 30 s. Rinsing in deionized water was performed after each step.

The HfO_2 films with a thickness of 40 nm were deposited on b-Si in a hot-wall Picosun Oy Sunale R-200 ALD reactor (Finland) at an evacuation to about 1 mbar. Pure nitrogen (99.999%) was used as a carrier gas and for purging the reactor after each reagent pulse. The well-known TEMAH (tetrakisethylmethyldamido hafnium (IV), $\text{Hf}[\text{N}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)]_4$) + H_2O precursor system was used [15]. TEMAH was delivered into the reactor from the heated source at 100°C. The wafer temperature was 250°C. The passivation films were activated by post-deposition in-situ annealing in N_2 ambient for 50 min at 440 °C. The samples were taken out from the reactor after cooling at room temperature. The thickness and refractive index of as-deposited and annealed samples were measured by ellipsometry. Unetched planar wafers (without b-Si) were coated as reference samples.

The cross-section and top-view morphology of the b-Si was observed by a scanning electron microscope (SEM). The optical reflectance of the b-Si surfaces was detected using a spectrophotometer T70 UV-VIS with an integrating sphere. The charge carrier lifetime was characterized using the photoconductance method in the transient mode (WTC-120 Sinton Instruments).

Results and discussion. Cross-section and top-view SEM images of the b-Si surfaces with and without an ALD HfO_2 film are shown in Fig. 2.

The morphology of the b-Si surface without a passivation film (Fig. 2,a) consists of slightly rounded needles with an average height of 400 nm and average spacing of 150 nm. In Fig. 2,b, the HfO_2 film can be distinguished from the cross-section as a lighter, narrow layer on top of the needles. It can be seen that the needles have been coated perfectly conformal with a HfO_2 passivation film, no blistering was observed after annealing on OH-terminated surfaces. Small changes in the b-Si nanostructure height and shape can be seen, i.e. the needles become shorter and denser. This can be attributed partly to the annealing of the films at 440 °C.

Thus, the ALD HfO_2 films precisely reproduce the morphology of the b-Si surface without any voids or inclusions. As a result, a good chemical passivation can be obtained.

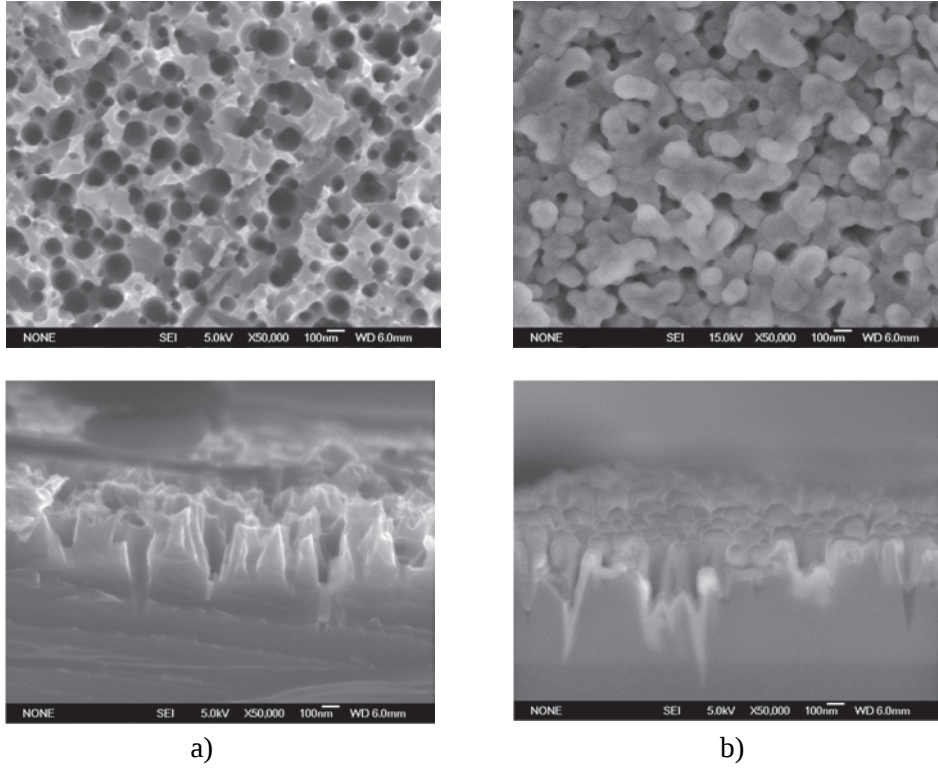


Fig. 2. SEM images of the b-Si surfaces with (b) and without (a) ALD HfO₂ film. The upper and the lower row display top-view and cross-section images, respectively.

Fig. 3 shows the minority carrier lifetimes as a function of injection level in planar Si wafer and b-Si surface coated by a ALD HfO₂ film. These two samples were fabricated using the identical ALD process.

The minority carrier lifetime is a relevant parameter of merit to estimate the surface recombination and surface damage. As can be seen from Fig. 3, the lifetime difference between the planar Si wafer and b-Si surface coated by an ALD HfO₂ film is not significant and the measured lifetimes are in the $10^{-3} \dots 10^{-4}$ s range. Therefore, despite the high surface area of b-Si and the potential surface damage induced by the RIE process, the passivation quality of HfO₂ on the b-Si surface is comparable to its passivation quality on the planar Si wafer. The improved surface passivation could be attributed to a reduction in the electrically active defect density at the Si/HfO₂ interface. Hydrogen from the HfO₂ bulk could diffuse to the interfacial region and provide the chemical passivation of the dangling bonds, reducing the defect related recombination rate [13]. Note also that the obtained carrier lifetimes by ALD HfO₂ films are comparable to that by ALD Al₂O₃ films [7-9].

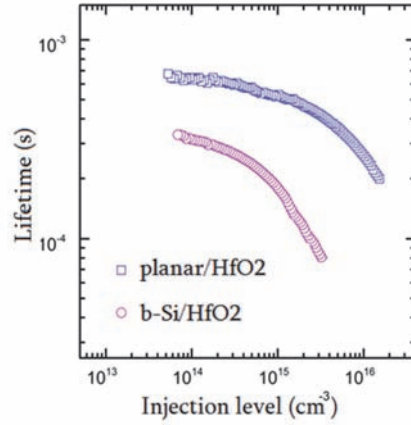


Fig. 3. Minority carrier lifetimes as a function of injection level in the planar Si wafer and the b-Si surface coated by ALD HfO₂ films

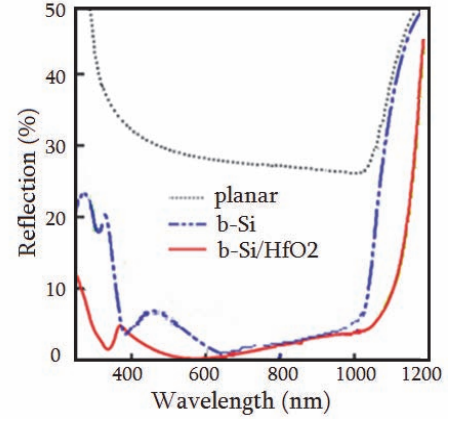


Fig. 4. Reflectance of the planar Si wafer and the b-Si surface with and without an HfO₂ film

Reflectivity measurements of three types of surfaces (planar Si wafer, b-Si surface with and without a HfO₂ film) are given in Fig. 4. As it is seen, the b-Si surface achieves a reflectance below 10% in the whole visible spectrum, as well as in the near UV and near IR regions. As a comparison, the reflectance of the planar Si wafer varies between 30 and 50% in the same wavelength range. By applying the ALD HfO₂ films on the b-Si surfaces, the reflectivity was decreased significantly to a minimum of 0.2...0.4% at around 500 nm. At the 700...1000 nm region of wavelength, the reflectance for the b-Si surface with and without a HfO₂ film is similar; while at higher wavelength, the reflectance for the b-Si surface with a HfO₂ film is a little lower than the surface without a HfO₂ film. Thus, in addition to the surface passivation, the ALD HfO₂ film further reduces the reflectance on the whole spectral range relevant for the solar cell operation. This is in agreement with the recent results, when the b-Si surface is coated with ALD Al₂O₃ films [7-9].

Conclusion. The increase in the surface recombination has always hindered the application of b-Si in solar cells. Our investigations show that the ALD HfO₂ film can solve this problem by providing completely conformal coating and excellent passivation on n-type b-Si surfaces. Besides, the ALD HfO₂ film reduces the reflectance of the b-Si surface on the whole spectral range relevant for the solar cell operation. The excellent surface passivation and low reflectance results prove the potential of using the combination of the b-Si surface and the ALD HfO₂ film in different photovoltaic devices. In particular, their application in the spectral selective double barrier n-type Si photodetectors is very actual [16].

This work was supported by the RA MES Committee of Science and RB State Committee of Science and Technology in the frames of the joint research project ArmBel-Ap18_2b-7.

REFERENCES

1. **Jian L., Ting Zhang, Peng Zhang, Shibin Li.** Review Application of Nanostructured Black Silicon // *Nanoscale Research Letters*. – 2018. – V. 13. – P. 1-10. - DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2523-4>.
2. **Xiaogang Liu, Paul C., Marius P.** Black Silicon: Fabrication Methods, Properties and Solar Energy Applications // *Energy Environ. Sci.* – 2014. – V.7.- P. 3223-3263.
3. **Ayvazyan G.Y., Barseghyan R.N., Minasyan S.A.** Optimization of Surface Reflectance for Silicon Solar Cells // *Green Energy and Smart Grids. E3S Web of Conferences*. – 2018. - V. 69.- P. 01008. - DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186901008>.
4. Black Silicon Photovoltaics / **M. Otto, M. Algasinger, H. Branz, et al** // *Advanced Optical Materials*. – 2015. – V. 3 (2). - P. 147-164.
5. **Bonilla R.S., Hoex B., Hamer P., Wilshaw P.R.** Dielectric Surface Passivation for Silicon Solar Cells: A Review // *Phys. Stat. Sol. (a)*.- 2017.- V. 214, № 7. - P. 1700293. - DOI: 10.1002/pssa.201700293.
6. Structural Properties of ZnO:Al Films Produced by the Sol–Gel Technique / **E.P. Zaretskaya, B.F. Gremenok, A.V. Semchenko, et al** // *Semiconductors*. – 2015.- V. 49, № 10.- P. 1253–1258.
7. Efficient Surface Passivation of Black Silicon Using Spatial Atomic Layer Deposition / **I. Heikkinen, P. Repo, V. Vähänissi, et al** // *Energy Procedia*.- 2017.- V. 124.- P. 282–287.
8. **Wang W.C., Lin C.W., Chen H.J.** Surface Passivation of Efficient Nanotextured Black Silicon Solar Cells Using Atomic Layer Deposition // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2013.- V. 5, № 19.- P. 9752–9759.
9. **Calle E., Ortega P, Gastrow G., Martín I.** Long-term Stability of Al₂O₃ Passivated Black Silicon // *Energy Procedia*. – 2016.- V. 92. – P. 341-346.
10. Black Silicon Solar Cells with Interdigitated Back-Contacts Achieve 22.1% Efficiency / **H. Savin, P. Repo, G. von Gastrow, et al** // *Nature Nanotechnology*.- 2015.- № 10.- P. 624-629.
11. Efficiency Enhancement of Nanotextured Black Silicon Solar Cells Using Al₂O₃/TiO₂ Dual-Layer Passivation Stack Prepared by Atomic Layer Deposition / **W.C. Wang, M.C. Tsai, J. Yang, et al** // *ACS Appl. Mater. Interfaces*.- 2015.- V. 7(19). – P. 10228–10237. - DOI: 10.1021/acsami.5b00677.
12. Surface Passivation of N-Type Doped Black Silicon by Atomic-Layer-Deposited SiO₂/Al₂O₃ Stacks / **B. Loo, A. Ingenito, M. Verheijen, et al** // *Appl. Phys. Lett.*- 2017.- V. 110, № 26.- P. 263106. - DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4989824>
13. Surface Passivation Properties of HfO₂ Thin Film on N-Type Crystalline Si / **X.M. Cheng, P. Repo, H. Haug, et al** // *IEEE Journal of Photovoltaics*.- 2017.- V. 7, № 2.- P. 479-485.
14. **Lebedev M.S.** Thin-film Compositions on Base of Hafnium Dioxide and Aluminum Oxide: Synthesis and Characterization // *Key Eng. Mater.* - 2012. - V. 508. - P. 7-10.
15. **Islamov D.R., Gritsenko V.A., Lebedev M.S.** Determination of Trap Density in Hafnia Films Produced by Two Atomic Layer Deposition Techniques // *Microelectronic Engineering*.- 2017.- V. 178.- P. 104–110. - DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2017.05.004>.

16. Identification and Analysis of Hazardous Materials Using Optical Spectroscopy / S. Khudaverdyan, V. Meliqyan, T. Hovhannisyan T., et al // Optics and Photonics Journal.- 2017.- V.7.- P. 6-17.- DOI: 10.4236/opj.2017.71002.

National Polytechnic University of Armenia; Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Novosibirsk, Russia; Francisk Scorina State University, Gomel, Belarus. The material is received 14.02.2019.

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ս.Խ. ԽՈՒՂԱՎԵՐԴՅԱՆ, Մ.Ս. ԼԵԲԵԴԵՎ, Ա.Վ. ՍԵՄՉԵՆԿՈ
N-Si-ՊԻ ՍԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ԱՐՑՈՒՆԱՎԵՏ ՊԱՍՍԻՎԱՑՈՒՄԸ

Մակերևութային վերամիավորման կորուստները զգալիորեն փոքրացնում են սև սիլիցիումի (b-Si) արդյունավետությունը արևային էլեմենտներում կիրառելու համար: Այդ կորուստները կարելի է նվազեցնել՝ մակերևութային պասսիվացնելով որոշակի մեկուսիչ թաղանթներով: Հետազոտվել են n-տիպի b-Si-ի մակերևութային ատոմաշերտային նստեցման մեթոդով ստացված հաֆնիումի երկօքսիդի (HfO_2) թաղանթի պասսիվացման հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ HfO_2 թաղանթը, բացի արդյունավետ պասսիվացումից, նվազեցնում է նաև b-Si-ի մակերևութային անդրադարձումը սպեկտրային լայն տիրույթում:

Առանցքային բաներ. սև սիլիցիում, արևային էլեմենտ, պասսիվացում, անդրադարձում, ատոմաշերտային նստեցում, հաֆնիումի երկօքսիդ:

Г.Е. АЙВАЗЯН, С.Х. ХУДАВЕРДЯН, М.С. ЛЕБЕДЕВ, А.В. СЕМЧЕНКО
ЭФФЕКТИВНАЯ ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ N-ТИПА

Потери, обусловленные поверхностной рекомбинацией, значительно снижают эффективность черного кремния (b-Si) для применения в солнечных элементах. Пассивация поверхности с использованием определенных диэлектрических пленок может минимизировать эти потери. Исследованы пассивирующие свойства пленки диоксида гафния (HfO_2), нанесенной на поверхность b-Si n-типа методом атомно-слоевого осаждения. Показано, что, помимо эффективной пассивации, пленка HfO_2 снижает отражение поверхности b-Si в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: черный кремний, солнечный элемент, пассивация, отражение, атомно-слоевое осаждение, диоксид гафния.

Ս.Գ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ, Ն.Դ. ԵԶԱԿՅԱՆ, Ն.Ս. ՄԿՐՏՉՅԱՆ

ՀԱՍՄԱԿՑՎԱԾ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԱԽՏՈՐՈՇԻՉ
ԲԺՇԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔ

Նկարագրված է բժշկական սարք, որը նախատեսված է մարդու կենսահյուսվածքներում, մարմնի տարբեր մասերում ախտորոշման և հետազոտությունների համար: Մարդու մաշկի վրա կարելի է ազդել տարբեր տիպի հոսանքներով (հաստատուն, փոփոխական, իմպուլսային և այլն): Շատ բժիշկների և գիտնականների կողմից հետազոտվել են էլեկտրական ազդանշանների ազդեցությունը մարդու մաշկի վրա: Ստացված արդյունքներով հնարավոր է ախտորոշել հիվանդության առկայությունը: Մարքը հնարավորություն է տալիս հետազոտել նաև ջերմաստիճանից կախված մարդու կենսադիմադրությունը մաշկի տարբեր կետերում: Մարքում նախատեսված է նաև ծրագրային ապահովում. համակարգչի միջոցով կատարվում է ազդանշանի թվային մշակում, պահպանվում են բժշկական տվյալները, ինչն էլ ապահովում է երկարաժամկետ հետազոտությունների շարք՝ յուրաքանչյուր այցելուի համար:

Առանցքային բառեր. ախտորոշում, հետազոտություն, կենսադիմադրություն, էլեկտրոդ, հոսանք:

Ներածություն: Ախտորոշման ժամանակ անհրաժեշտ է իմանալ ոչ միայն ազդող գործոնի պարամետրերը, այլև օրգանիզմի ռեակցիան տվյալ գործոնին: Մաշկի էլեկտրական հատկությունները պայմանավորված են մաշկի հյուսվածքների կառուցվածքով: Այդ հատկությունների գնահատման լավագույն գործոնը մաշկի կենսադիմադրությունն է կամ էլեկտրահաղորդականությունը, որն էլ իր հերթին կախված է մի շարք այլ գործոններից, օրինակ՝ մաշկի եղջերաթաղանթի հաստությունից, որից կախված՝ մարմնի վերնամաշկի դիմադրությունը առանձին հատվածներում կազմում է տասնյակից մինչև հարյուր հազարավոր Օմ-եր [1]:

Էլեկտրոդների միջոցով մաշկի տարբեր կետերին տրվում է հոսանք, որն էլեկտրոդից էլեկտրոդ անցնում է հիմնականում ամենափոքր դիմադրության շերտով: Այդ դիմադրությունը կարող է փոփոխվել՝ կախված մաշկի արնահոսքի արագությունից: Հոսանքը մեծ դիմադրության է հանդիպում վերջույթների շրջաններում, որտեղ շատ են ոսկրերը, ջլերը, իսկ մկանները հիմնականում քիչ են [2]:

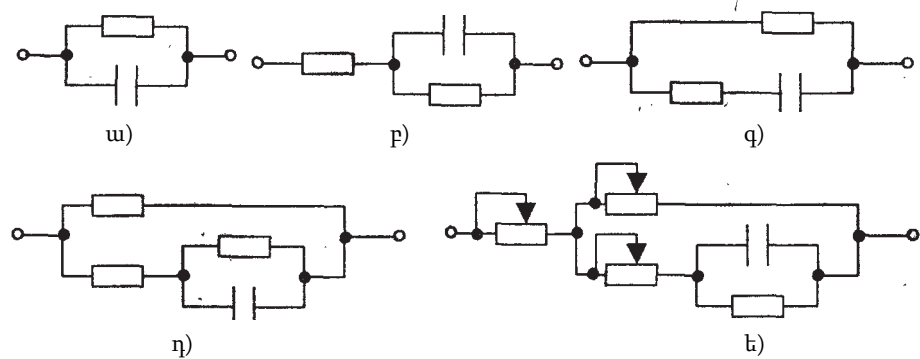
Եղջերաթաղանթի վերին շերտն ունի մեծ դիմադրություն հաստատուն հոսանքի նկատմամբ, և այն կարելի է դիտարկել որպես դիէլեկտրիկ՝ ունակային հատկությամբ ($0,01...0,02$ մկՖ/սմ²) [1]:

«Էլեկտրոդ-մաշկ» անցումային դիմադրության փոքր լինելը կարևոր նախապայման է: Այդ դիմադրությունը կախված է էլեկտրոդի նյութից, մաշկի հատկություններից, էլեկտրոդի հետ շփման մակերեսից:

Մաշկի էլեկտրական հատկությունները որոշելու համար պետք է օգտագործենք մաշկ-էլեկտրոդ սեղմակի համարժեք սխեմա (նկ. 1):

Մաշկ-էլեկտրոդ սեղմակի (ՄԷՍ) յուրաքանչյուր առանձին մակերևույթ կարելի է ներկայացնել համարժեք էլեկտրական սխեմայով, որը պարունակում է դիմադրություններ և ունակություններ:

Ցածր հաճախաշերտում այն կարելի է ներկայացնել զուգահեռ միացված դիմադրության և ունակության միջոցով (նկ. 1).



Նկ. 1. Գենսաբանական օբյեկտի համարժեք էլեկտրական տիպային սխեմաները ցածրհաճախային շերտում. ա) պարզագույն սխեման, բ) մաշկի շերտի և ենթամաշկային ցանցերի ուսումնասիրության դեպքում, գ) մկանային հյուսվածքին զուգակցելով այլ բաղադրիչներ, դ) մարմնի ավելի խոր շերտերի և ներքին օրգանների ուսումնասիրության դեպքում, ե) ներքին մակերեսներում [3, 4]

Դիտարկենք գոյություն ունեցող էլեկտրոդները, քանի որ դրանք կարևոր դեր են կատարում ՄԷՍ հանգույցում: Էլեկտրոդները բաժանվում են 3 հիմնական խմբի.

- Մետաղական էլեկտրոդներ. այս տեսակի էլեկտրոդները մեծ կիրառություն չունեն, երբ օգտագործվում են հեղուկ միջավայրում, քանի որ մետաղների մեծ մասը շատ արագ օքսիդանում են:
- Էլեկտրոդների երկրորդ տեսակը պատրաստում են մետաղից ու տվյալ մետաղի աղից. մետաղ – մաշկ հպման դեպքում մասնակցում են մետաղի աղի և անիոնների բաղադրիչները, որոնք լավացնում են չափման գործընթացը:
- Էլեկտրոդների երրորդ խումբը (գազով էլեկտրոդներ) ներկայացնում է ավելի բարդ համակարգեր: Այս էլեկտրոդները կառուցվածքով ծակոտկեն համակարգեր են, օրինակ՝ պլատինային խառնուրդ, գրաֆիտ, երբեմն ոսկի՝ փոշի վիճակում:

Արծաթե էլեկտրոդների առավելությունն այն է, որ կայունացումից հետո էլեկտրոդներն ունեն պրակտիկորեն զրոյական շեղում: Էլեկտրոդները կարող են գտնվել տարբեր ջերմային պայմաններում, իսկ ջերմաստիճանների տարբերության պատճառով առաջացած պոտենցիալի շեղումը չի ազդում չափման արդյունքների վրա: Երբեմն արծաթի էլեկտրոդների վրա «նստեցնում» են քլորիդի շերտ. այս դեպքում շեղումը մի կարգ ավելի պակաս է լինում:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Բուժման նպատակով էլեկտրաֆիզիոթերապիայում օգտագործում են մի շարք մեթոդներ.

- Ամպլիտուդա-պուլսային թերապիա. այս մեթոդում օգտագործվում է փոփոխական սինուսոիդալ 2...5 կՀց հաճախությամբ հոսանք՝ մոդուլացված 10...150 Հց ցածր հաճախականությամբ: Ամպլիտուդային մոդուլացիայի խորությունը կարգավորվում է 0-ից 100%:

- Ֆլուկտորիզացիա. այս դեպքում ազդում են փոփոխական սինուսոիդալ փոքր լարումով, որն ապահովում է ցածր հոսանք և փոփոխվում է պատահականորեն՝ ըստ ամպլիտուդի և հաճախականության (100...2000 Հց սահմաններում):

- Կարճ իմպուլսային էլեկտրաանոթայացում (ԿԻԷ). այս դեպքում ազդում են շատ կարճ ուղղանկյուն իմպուլսներով (0,02...0,5 մվրկ) կամ երկբևեռ էլեկտրական իմպուլսներով՝ 2-ից 400 Հց հաճախականությամբ:

- Էլեկտրախթանման դեպքում օգտագործում են էքսպոնենցիալ, ուղղանկյուն միակ իմպուլսներ կամ իմպուլսային շարքեր ու նրանց միջև դադարներ [2, 5]:

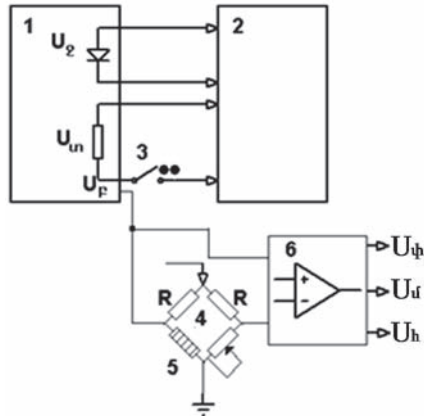
Գոյություն ունեցող մեթոդներում բացակայում է հիվանդի ֆիզիոլոգիական վիճակի մասին տեղեկատվական հետադարձ կապը, ինչը թուլացնում է բուժման արդյունավետությունը: Ընտրված բուժման մեթոդի արդյունավետությունը գնահատվում է միայն բուժման կուրսի ավարտից հետո:

Մեր կողմից առաջարկված սարքի միջոցով հնարավոր է գնահատել բուժման արդյունավետությունը հենց սկզբից, գնահատել առաջացող ֆիզիկական փոփոխությունները և, ըստ այդմ, ախտորոշել և կատարել համապատասխան եզրակացություն բուժման ընթացքի վերաբերյալ (շարունակել կամ ընդհատել, փոխել կիրառվող լարման պարամետրերը):

Մեր կողմից մշակվել են սարքի, ինչպես նաև ներագրող և չափող գլխիկի (ՆԶԳ) առաջին նախատիպերը:

Գոյություն ունեցող չափիչների մեծ մասում տաքացում նախատեսված չէ: Տաքացման դեպքում նկատվում են ֆիզիոլոգիական փոփոխություններ, որոնք հնարավոր չէ գրանցել չափացվող գլխիկներով: Բժշկին տրված է ազատություն՝ ընտրելու ազդող լարման տեսքը:

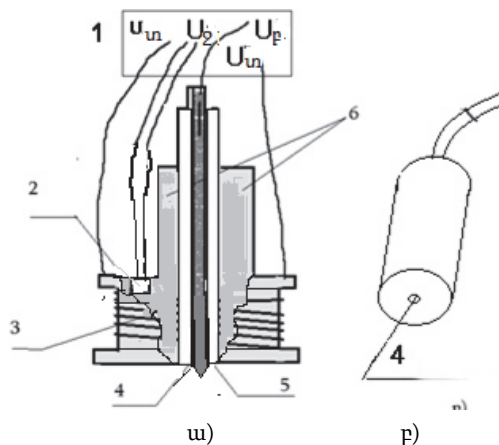
Մեր կողմից մշակված սարքն ունի հետևյալ կառուցվածքային սխեման (նկ. 2) (պարզության համար ներառված չեն սնուցման սխեման և նրա միացումները):



Նկ. 2. Մարքի կառուցվածքային սխեման

Նկ. 2-ում 1-ը ՆՉԳ-ն է, 2-ը ջերմակայունացուցիչ է, 3-ի միջոցով կատարում ենք ՆՉԳ-ի տաքացման միացում, 4-ը Ուինսթոնի կամրջակն է, որի մուտքին տրվում է համակարգչով մշակված ազդանշան, իսկ 5-ը մաշկն է: Փոփոխական դիմադրության միջոցով դնում ենք մաշկի դիմադրությանը համարժեք լարում: 6-ը կենսապոտենցիալի ազդանշանի ուժեղարարն է, որի մի մուտքին տրվում է 4 կամրջակի մաշկին համարժեք դիմադրության վրա ձևավորված լարումը, իսկ մյուս մուտքին՝ կենսապոտենցիալային լարումը: 6-ի ելքում ունենք կենսապոտենցիալի ազդանշանի հաստատուն (U_h), փոփոխական (U_ϕ) և միջին (U_ψ) արժեքներ, որոնք հետագայում ենթարկվում են թվային մշակման:

ՆՉԳ-ն մետաղական արծաթե էլեկտրոդ է, որը գտնվում է զլանաձև տաքացուցիչի կենտրոնում և մեկուսացված է նրանից: Տաքացուցիչն ապահովում է էլեկտրոդի շուրջը մաշկի համասեռ ջերմաստիճանը:



Նկ. 3. ՆՉԳ-ի ներքին կառուցվածքը (ա) և ընդհանուր տեսքը (բ)

ՆՉԳ-ն կազմված է հետևյալ մասերից (նկ. 3).

1. Հաղորդալարեր, որոնք ապահովում են գլխիկի և սարքի միջև կապը (U_m – տաքացման լարում, U_g – ջերմատվիչի լարում, U_F – կենսապոտենցիալ լարում):

2. Կիսահաղորդչային ջերմատվիչ, որն ապահովում է մաշկի շրջակայքի հաստատուն ջերմաստիճանի հսկումը:

3. Փաթաթված նիքրոմե լար, որն ապահովում է էլեկտրոդի տաքացումը:

4. Արծաթե լար (1 մմ տրամագծով), որի միջոցով կատարում ենք կենսադի-մադրության չափումը:

5. Մեկուսիչ է 4-ի և 6 –ի միջև:

6. Տաքացվող մարմին (արծաթապատ բրոնզ):

Ցանցային հաճախության գուման համար օգտագործվում է թվային գոտի, որը անցկացնելով օգտակար ազդանշանը՝ հիմնովին ճնշում է 50 Հց խանգարումները: Թվային գոտիի առավելությունն այն է, որ տվյալ միջակայքից դուրս գոտիչը որևէ հաճախություն չի մարում և նկատելի փուլային շեղում չի առաջացնում:

Տաքացվող գլխիկն ունի մինչև 50°C տաքանալու հնարավորություն, քանի որ դրանից ավելի ջերմային տաքացումը կհանգեցնի մարդու մաշկի այրման:

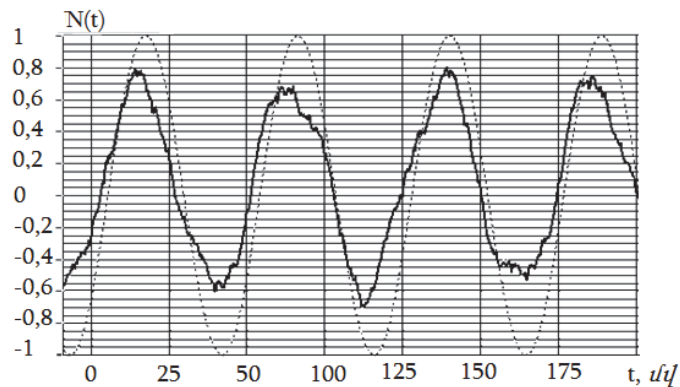
Սարքն աշխատում է հետևյալ կերպ: Ցանցի միացումից հետո բժիշկն ինքն է որոշում ՆՉԳ-ն տաքացնելու անհրաժեշտությունը: Այնուհետև մաշկին արտա-քինից միացվում են ՆՉԳ-երը՝ համապատասխան վայրերում:

Հանգստի վիճակում գտնվող հետազոտվողի մաշկին գեներատորից տրվում է հաստատուն լարում: Այնուհետև սարքի ելքային լարման միջին արժեքը զրոյաց-վում է՝ Ուինսթոնի կամրջակի փոփոխական դիմադրության միջոցով: Դրանից հետո հետազոտվողի մաշկին տրվում է որոշակի տեսքով ազդանշան, և որոշ-վում են ազդանշանի փոփոխական և հաստատուն բաղադրիչները: Կախված ազ-դող լարումից, հետազոտվողի տարիքից, առողջական վիճակից և մաշկի տեղա-մասից՝ կարող են ստացվել տարբեր ելքային լարումներ:

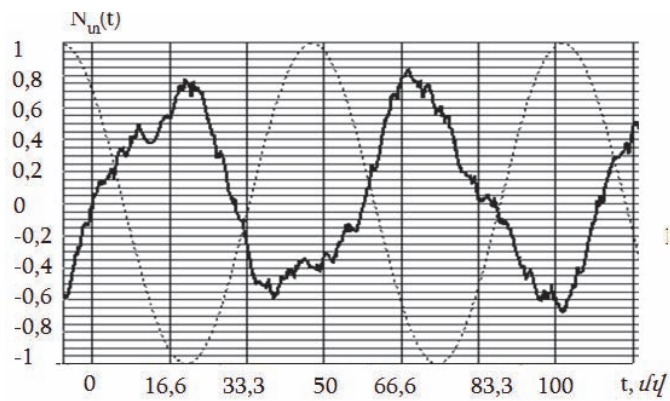
Հետազոտության արդյունքները: Չափումները կատարվել են հարմոնիկ ազդանշանների դեպքում, քանի որ ոչ հարմոնիկ ազդանշանի դեպքում առաջա-ցած հարմոնիկների կազմը և փոփոխությունը գնահատելն ավելի բարդ է: Տրվել է 500 ՎՄ ամպլիտուդով հարմոնիկ լարում՝ տարբեր հաճախականություններով (գրաֆիկի մուտքը ներկայացված է նորմավորված տեսքով): Համակարգչի մուտ-քին կարող ենք տալ 200 ՎՄ առավելագույն լարում, ըստ որի էլ նորմավորվում է սարքի ելքային լարումը:

Թվային մշակման ժամանակ օգտագործել ենք համակարգչի անալոգային մուտքը (միկրոֆոնի մուտքը) և ելքը (ականջակալի ելքը): Միկրոֆոնի մուտքն ունի լարման սահմանափակ տիրույթ: Թույլատրվող ազդանշանը գերազանցելու դեպքում անալոգային ազդանշանի պատկերն աղավաղվում է (գազաթներում

հագեցում), ունենում ենք տեղեկատվության կորուստ: Ուժեղացման կարգավորման միջոցով ընտրում են ազդանշանի այնպիսի արժեք, որ նորմավորումից հետո պատկերի առավելագույն արժեքները չգերազանցեն 0,8...1 տիրույթը: Գրաֆիկներում մուտքային ազդանշանը ներկայացված է կետագծով, իսկ ելքայինը՝ հոծ գծով, իսկ ժամանակը՝ միլիվայրկյաններով (նկ. 4, 5), ընդ որում, թվային մշակման ժամանակ չափված տատանումների փոփոխական ազդանշանների փուլային շեղումները պայմանավորված են միայն ծրագրում կատարվող մաթեմատիկական գործողություններով: Նշենք, որ անալոգային չափումների ժամանակ փուլային շեղումը չի գերազանցում 5 աստիճանը, որն էական չէ:



ա)

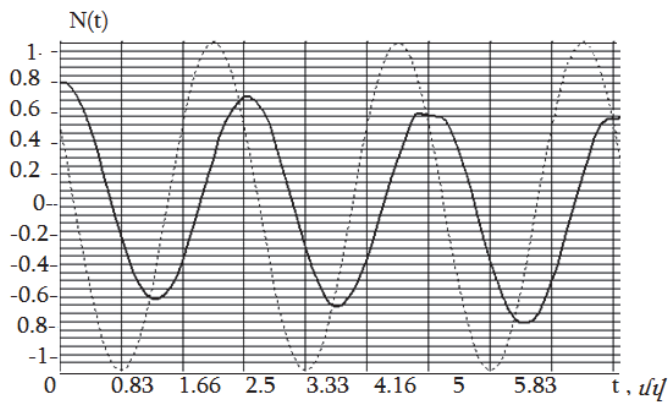


բ)

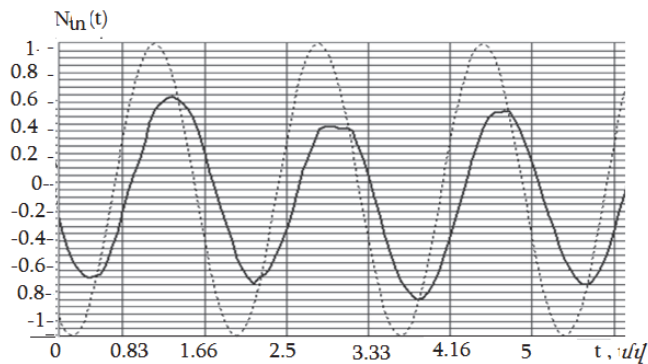
Նկ. 4. Մուտքային և ելքային ազդանշանները՝ 20 Հց հաճախության դեպքում.

ա) շրջապատի ջերմաստիճանում, բ) տաքացմամբ

Ցածր հաճախություններում (մինչև 100 Հց) նկատվում են բարձր հարմոնիկների առկայություն և դրանց ինտենսիվության զգալի մեծացում՝ տաքացման դեպքում:



ա)



բ)

Նկ. 5. Մուտքային և ելքային ազդանշանները՝ 400 Հց ազդանշանի դեպքում. ա) շրջապատի ջերմաստիճանում, բ) տաքացմամբ

Բարձր հաճախություններում հարմոնիկների քանակը ավելի քիչ է, և ազդանշանը գրեթե կրկնում է մուտքային ազդանշանը: Այլ հարմոնիկների ինտենսիվությունները շատ քիչ են մեծանում տաքացման դեպքում:

Եզրակացություն: Այսպիսով, սարքը նախատեսված է բժշկական հաստատությունում օգտագործելու համար՝ ինչպես ախտորոշման, այնպես էլ հետազոտական նպատակներով: Սարքը կարելի է օգտագործել ն՝ ստացիոնար, և՝ արտահիվանդանոցային պայմաններում, քանի որ ծախսում է փոքր հզորություն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ливенсон А.Р.** Электробезопасность медицинской техники. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Медицина, 1981. - 279 с.
2. **Ясногородский В.Г.** Электротерапия.- М.: Медицина, 1987. - 240 с.

3. **Кореневский Н.А., Попечителев Е.П., Филист С.А.** Проектирование электронной медицинской аппаратуры для диагностики и лечебных воздействий: Монография. – Курск: Курск. гор. типография, 1999. – 537 с.
4. **John G.** Medical Instrumentation: Application and Design.- 4th Edition.- Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 713 p.
5. **Лоцилов В.И., Калакутский Л.И.** Биотехнические системы электронеиристимуляции. – М.: МГТУ, 1991. – 168 с.

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.02.2019:

С.Г. МАРТИРОСЯН, А.Г. ГУЛЯН, Н.Д. ЕЗАКЯН, Н.С. МКРТЧЯН

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МЕДИЦИНСКОЕ УСТРОЙСТВО С КОМБИНИРОВАННЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Описано медицинское устройство, которое предусмотрено для использования в диагностических и исследовательских целях на биотканях и кожных покровах различных частей тела человека. На кожный покров человека можно воздействовать различными типами токов (постоянный, альтернативный, импульсный и т.д.). Многими врачами и учеными исследованы воздействия электрических сигналов на организм человека. Используя полученные результаты, можно диагностировать наличие болезни у пациента. Устройство также позволяет выполнять температурозависимые исследования в разных точках кожи тела измерением биоимпеданса человека. Разработано также программное средство, позволяющее с помощью компьютера выполнять цифровую обработку сигнала, сохранять медицинские данные, что обеспечивает долгосрочные исследования для каждого пациента.

Ключевые слова: диагностика, исследование, биоимпеданс, электрод, ток.

S.G. MARTIROSYAN, A.G. GHULYAN, N.D. EZAKYAN, N.S. MKRTCHYAN

MEDICAL DIAGNOSTIC DEVICE WITH COMBINED PHYSICAL EFFECTS

A biomedical device which is supposed to be used for diagnosis and investigation in bio tissues and skin in different parts of a human body is described.

The skin of a human can be affected by different types of currents (direct, alternate, pulse, etc). Many doctors and scientists have investigated the effects of the electrical signals on a human's organism. The results of these studies can be used to diagnose the presence of a disease in the patient. The device also allows to perform bioimpedance of the person suspended by temperature in different points of the skin. A software is also developed allowing, with a computer, to carry out the digital processing of the signal, as well as maintain the medical data which ensures a long-term research for each patient.

Keywords: diagnostic, investigation, bioimpedance, electrode, current.

A.E. YESAYAN

**A CAPACITANCE MODEL OF A SHORT CHANNEL DOUBLE-GATE
FINFET INCLUDING A MOBILITY DEGRADATION EFFECT**

A capacitance compact and explicit model is introduced for a short channel Double gate (DG) undoped FinFET including the mobility degradation effect. The capacitance model is developed on the basis of the channel charge partition, and is the generalization of previously developed capacitance model accounted only for constant mobility. The presented analytical compact model is validated with 3D Atlas simulations performed with the CVT mobility model.

Keywords: DGFinFET/MOSFET, capacitance model, mobility degradation, short channel effects, compact modeling

Introduction. Multigate FinFETs are recognized as the best candidates for down-scaling CMOS technologies. The key factors that limit how far a multi-gate MOSFET/FinFET can be scaled come from short-channel effects such as threshold voltage roll-off, drain-induced barrier lowering, velocity saturation followed by mobility degradation. Among the great variety of FinFETs the DG FinFET is recognized as the most stable to device variability. During the last decade a great number of scientific works have been published on modeling and characterization of DG FinFETs [1-5]. Compact models are critically important for circuit simulations. Based on the EKV formalism, the charge-based compact model was developed for a long channel, undoped DG MOSFET [4]. Further, this model was extended for a ultra-scaled DG FinFETs still being fully explicit and physics-based [5]. The static model accurately accounts for all short channel effects, and the model was validated down to 25 nm channel length. Based on the Ward channel charge partition [6], the trans-capacitance model was developed for a long channel DG FinFET [2], and further it was extended for short channel DG FinFETs [5], but at that stage of development, the mobility degradation effect was not considered in the capacitance model. However, the velocity saturation followed by mobility degradation is the dominating effect while shrinking the channel length. The scope of this work is to include the mobility degradation effect in the previously developed quasi-static model preserving the accuracy of the model. The paper is organized as follows: in Section 1, the trans-capacitance model for the DG FinFET is presented, in Section 2, the mobility dependence on the longitudinal electric field is introduced in trans-capacitance equations, Section 3 presents the validation and discussion of the developed model.

Methodology: Capacitance model

1. **A capacitance model considering the constant mobility.** For the subsequent clear introduction of the mobility degradation effect in the capacitance model, here we briefly introduce the main equations of the core capacitance model. In the following derivation we use normalized quantities, and for applied voltages, drain current, and charges, the following normalization factors are used:

$$V_{norm} = U_T = \frac{k \cdot T}{q}, \quad I_{norm} = 4 \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{H \cdot U_T^2}{L}, \quad Q_{norm} = 4 \cdot C_{ox} \cdot U_T.$$

The normalized gate charge (q_G) computed from two gates can be obtained by integrating the normalized mobile charge density (q_m) over the area of the gate region:

$$q_G = -H \int_0^L q_m dx, \quad (1)$$

where H and L are the device height and length respectively.

Following the channel charge partition proposed by Ward, the normalized drain charge (q_D) is defined as:

$$q_D = H \int_0^L \frac{x}{L} \cdot q_m dx. \quad (2)$$

The integration variables x and dx can be expressed by means of drain current and terminal voltages according to [7] :

$$x = -\frac{L}{i} \cdot \int_{v_s}^v q_m \cdot dv, \quad (3)$$

$$dx = -\frac{L}{i} \cdot q_m \cdot dv, \quad (3.1)$$

where $i(v)$ and $q_m(v)$ dependences are defined in the long channel charge based model [4].

For the sake of completeness, here we remind the main relationships of that model:

$$i = -q_m^2 + 2 \cdot q_m + \frac{2}{\alpha} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \Bigg|_{q_{ms}}^{q_{md}} \quad \text{with } \alpha = \frac{C_{ox}}{C_{si}} \text{ and } q_m < 0, \quad (4)$$

$$v_g - v_{to} - v_{ch} = -2 \cdot q_m + \ln\left(-\frac{q_m}{2}\right) + \ln\left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m\right). \quad (5)$$

Differentiating (5) yields:

$$\frac{dq_m}{dv_g} = -\frac{dq_m}{dv} = -\frac{1}{2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m}}. \quad (6)$$

By substituting (6) into equations (3) and (3.1):

$$x = -\frac{L}{i} \cdot \left[q_m^2 - 2 \cdot q_m - \frac{2}{\alpha} \cdot \ln\left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m\right) \right] \Bigg|_{q_{ms}}^{q_m}, \quad (7)$$

and

$$dx = -\frac{L}{i} \cdot q_m \cdot \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) \cdot dq_m. \quad (8)$$

Further, by substituting (7) and (8) into (1) and (2), and by taking into account (5) and (6) the expressions for gate and drain charges are calculated and presented in the normalized form in the Appendix with equations (A1) and (A2) respectively. Once we have the expressions for q_G and q_D , the source charge is easy to compute as: $q_G + q_S + q_D = 0$.

The capacitances are defined as: $c_{kl} = \pm \frac{\partial q_k}{\partial v_l}$, where k, l refer to the gate, drain and source terminals.

The corresponding equations derived for c_{gg} , c_{dd} and c_{dg} are presented in Appendix A with (A3), (A4), (A5). All the other capacitance expressions can be calculated by the same mechanism, also by using the relationships between the capacitances.

1. A capacitance model including the mobility degradation effect. The mobility dependence on the longitudinal electric field can be accurately modeled

as $\mu_{eff} = -\frac{\mu_{\perp}}{1 + E_{\parallel} / E_c}$, where $E_c = \frac{V_{sat}}{\mu_{\perp}}$ is the electric field at velocity saturation

(V_{sat} is the carrier velocity saturation), $E_{\parallel} = \frac{dV}{dx}$ is the longitudinal electric field,

$\mu_{\perp}$ - the transverse effective and is modeled by Mathias's rule. The degradation of transverse mobility is due to the scattering on the acoustic and optical phonons and on the surface roughness and becomes significant for thin body FinFets. The expressions for $\mu_{\perp}$ were presented in [5]. In the development of a static model, the mobility degradation due to the longitudinal electric field is modelled by the concept of the channel length modulation. However, in the development of the DC model, the mobility dependence on the longitudinal electric field should be accurately considered in equations (1)-(2).

Thus equations (7) and (8) should be replaced by:

$$x = -\frac{L}{i} \left(q_m^2 - 2q_m - \frac{2}{\alpha} \ln(1 - \frac{\alpha}{2} q_m) \right) \Big|_{q_{ms}}^{q_m} - \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \left(2q_m + \ln(-q_m) - \ln(\frac{2}{\alpha} - q_m) \right) \Big|_{q_{ms}}^{q_m}, \quad (9)$$

$$dx = \left(-\frac{L}{i} q_m - \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \right) \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) dq_m. \quad (10)$$

Then, for the gate charge we got:

$$q_{G_mob} = q_G + H \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \left(q_m^2 - 2q_m - \frac{2}{\alpha} \ln(1 - \frac{\alpha}{2} q_m) \right) \Big|_{q_{ms}}^{q_{md}}, \quad (11)$$

where q_G is given by (A1) in Appenix A.

Similarly, for the drain charge from (2), (9) and (10) we calculate :

$$q_{Dmob} = q_D + q_{Dm}, \quad (12)$$

where q_D is defined with (A2) and q_{Dm} arises due to the velocity saturation effect and is calculated as:

$$q_{Dm} = \frac{H}{i} \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T (Int1 - Term1 * Int2 + Int33 - Term2 * Int22) + \frac{H}{L} \left(\frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \right)^2 Int3 - \frac{H}{L} \left(\frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \right)^2 Term2 * Int2,$$

where $Term1$, $Term2$, $Int1$, $Int2$, $Int22$, $Int3$, $Int33$ are the functions from the normalized mobile charge at the source and drain edges and are presented in Appendix B in the form of integrals. These integrals are easy to calculate, however for calculations of capacitances it is not required.

The source charge is calculated as $q_{G_mob} - q_{Dmob} = q_{smob}$.

Further capacitances are calculated as derivatives of terminal charges. Taking into account (11), (12), (6) and (4), the following expression for capacitances are calculated:

$$c_{gg_mob} = c_{gg} + H \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T (q_{md} - q_{ms}), \quad (13)$$

$$c_{dg_mob} = c_{dg} - \frac{H}{i} \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \left(-Term3|_{q_{md}} + Term1 * (q_{md}) - q_{ms} * i - Term4|_{q_{ms}}^{q_{md}} + Term2 * \right. \\ \left. * (q_{md}^2 - q_{ms}^2) + \frac{i * q_G}{H * L} \right) - \frac{H}{L} \left(\frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \right)^2 (-Term5 - i + (q_{md}) * Term2), \quad (14)$$

$$c_{dd_mob} = c_{dd} - \frac{H}{i} \frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T (Term3|_{q_{md}} - Term1 \cdot (q_{md}) + Term4|_{q_{md}} - Term2 \cdot \\ \cdot (q_{md}^2)) - \frac{H}{L} \left(\frac{\mu_{\perp}}{v_{sat}} U_T \right)^2 (Term5 - (q_{md}) \cdot Term2), \quad (15)$$

where c_{gg} , c_{dg} and c_{dd} are the capacitances calculated considering the constant mobility and are given by (A3), (A4) and (A5), Term3, Term4 and Term5 are defined in Appendix B. Consequently all the other capacitances can be defined in the same way.

2. Discussion and model validation. The capacitance model is important for the variation-aware design of FinFet. The trans-capacitances are very sensitive to random fluctuations caused by imperfect fabrication in IC fabrication process. The developed model is smooth, continuous and accurate throughout all operating regimes.

The capacitance in subthreshold regime is determined by inter-electrode coupling which is significant for short channel devices. According to Gauss' law, the inter-electrode coupling charge density is given by the perpendicular electric field terminating on the chosen electrode. Then corresponding capacitances are calculated as charge derivatives to corresponding terminal voltages and introduced in the developed model as it was described in [5]. Accordingly geometrical length of channel is replaced with effective channel length: $(L - L_p)$, where L_p is responsible for inter-electrode charge coupling in subthreshold and saturation regimes and is given in [5]. The velocity saturation effect is introduced through equations (9) and (10) and so is included in (13) - (15).

The quantum mechanical effects (QME) are also included in the model as it was presented in [5].

The developed capacitance model is validated with 3D Atlas simulations, where CVT mobility model is considered. It is worth to note that there are only two empirical parameters in the model, which are included in transverse mobility expression [5]. Figs 1-3 present calculations for FinFET with a channel length of 40 nm and Fin thickness of 10 nm, analytical calculations are presented with lines and numerical simulations with symbols. The calculations are carried out both in linear and saturation regimes ($V_g = 0.1$ V and $V_g = 1$ V). The capacitance C_{gg} is presented in Fig.1, C_{sg} and C_{dg} are presented respectively in Fig. 2 and Fig. 3. Fig. 4 presents calculations for FinFET with a channel length of 25 nm and a Fin thickness of 3 nm. For thin Fins, QME become significant and in Fig.4 the calculations including QME are presented as well. The calculations excluding

QME are presented to make evident the accuracy of the mobility degradation effect introduction in the model. The good agreement of the model with 3D simulations makes it evident that the developed analytical model has good accuracy from a weak to a strong inversion.

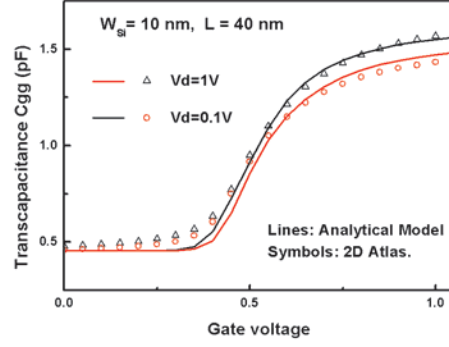


Fig. 1. Trans-capacitance C_{gg} obtained from the model and simulations

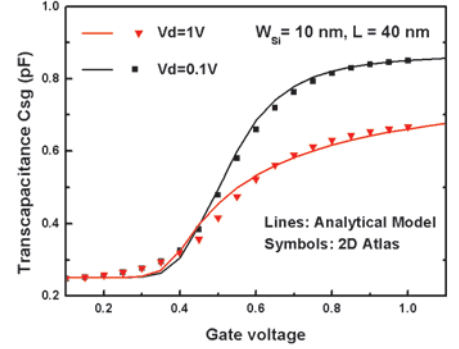


Fig. 2. Trans-capacitance C_{sg} obtained from the model and simulations

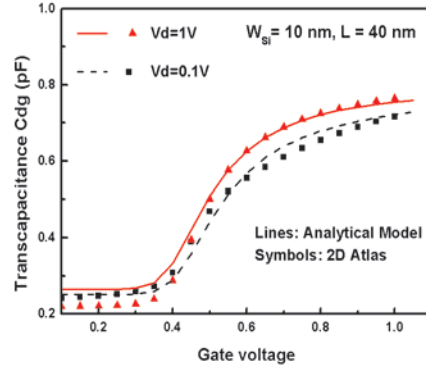


Fig. 3. Trans-capacitance C_{dg} obtained from the model and simulations

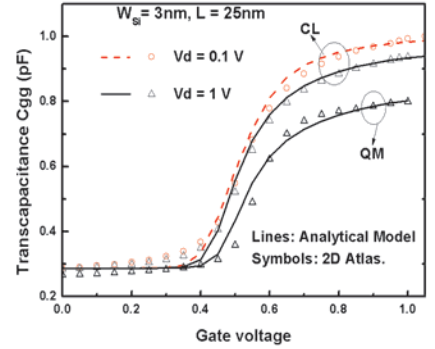


Fig.4. Trans-capacitance C_{gg} calculated with and without quantum mechanical effects, both from the model and simulations

Conclusion. In this work the trans-capacitance model is presented for a short channel DG MOSFET/FinFET accurately considered for the mobility degradation effect, quantum mechanical effects, as well as inter-electrode coupling. The model relies on the channel charge partition and is physics-based, thus the model is valid for a large range of FinFET geometrical parameters. The analytical capacitance model was validated with Silvaco 3D Atlas simulations for channel lengths varying from 50 to 25 (nm).

Appendix A

$$q_G = \frac{H \cdot L}{i} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot q_m^3 - q_m^2 - \frac{2}{\alpha} \cdot q_m - \frac{4}{\alpha^2} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \right] \Bigg|_{q_{ms}}^{q_{md}}, \quad (A1)$$

$$q_D = \frac{H \cdot L}{i^2} \cdot \left\{ Int1 - \left[q_{ms}^2 - 2 \cdot q_{ms} - \frac{2}{\alpha} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_{ms} \right) \right] \cdot \frac{i \cdot q_G}{H \cdot L} \right\}, \quad (A2)$$

where

$$Int1 = \left\{ \begin{aligned} & \frac{2}{5} \cdot q_m^5 - \frac{3}{2} \cdot q_m^4 + \left[\frac{4}{3} - \frac{2}{9 \cdot \alpha} - \frac{4}{3 \cdot \alpha} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \right] \cdot q_m^3 \\ & + \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{2}{3 \cdot \alpha^2} + \frac{2}{\alpha} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \right] \cdot q_m^2 \\ & + \left[-\frac{8}{3 \cdot \alpha^3} + \frac{4}{\alpha^2} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \right] \cdot q_m + \frac{304}{9 \cdot \alpha^4} - \frac{64}{5 \cdot \alpha^5} \\ & - \frac{44}{3 \cdot \alpha^3} - \frac{16}{3 \cdot \alpha^4} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) + \frac{4}{\alpha^3} \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot q_m \right) \right]^2 \end{aligned} \right\} \Bigg|_{q_{ms}}^{q_{md}}$$

$$c_{gg} = -\frac{H \cdot L}{i} \cdot (q_{ms}^2 - q_{md}^2) + \frac{q_G}{i} \cdot g_m, \quad (A3)$$

$$c_{dd} = -\frac{H \cdot L}{i} \cdot q_{md}^2 + \frac{2 \cdot q_D}{i} \cdot q_{md}, \quad (A4)$$

$$c_{dg} = -\frac{H \cdot L}{i} \cdot q_{md}^2 - \frac{q_{ms} \cdot q_G}{i} + \frac{2 \cdot q_D}{i} \cdot g_m. \quad (A5)$$

Appendix B

$$Int1 = \int_{q_{ms}}^{q_{md}} q_m \left(q_m^2 - 2q_m - \frac{2}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} q_m \right) \right) \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) \cdot dq_m,$$

$$Term1 = \left(q_{ms}^2 - 2q_{ms} - \frac{2}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha}{2} q_{ms} \right) \right),$$

$$Int2 = \int_{q_{ms}}^{q_{md}} q_m \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) dq_m,$$

$$Int33 = \int_{q_{ms}}^{q_{md}} q_m^2 \left(2q_m + \ln(-q_m) - \ln \left(\frac{2}{\alpha} - q_m \right) \right) \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) dq_m,$$

$$Int3 = \int_{q_{ms}}^{q_{md}} q_m \left(2q_m + \ln(-q_m) - \ln \left(\frac{2}{\alpha} - q_m \right) \right) \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) dq_m,$$

$$\begin{aligned}
Int22 &= \int_{q_{ms}}^{q_{md}} q_m^2 \left(2 - \frac{1}{q_m} + \frac{1}{\frac{2}{\alpha} - q_m} \right) dq_m, \\
Term2 &= \left(2q_{ms} + \ln(-q_{ms}) - \ln\left(\frac{2}{\alpha} - q_{ms}\right) \right), \\
Term3 &= \left(q_m^3 - 2q_m^2 - \frac{2}{\alpha} q_m \ln\left(1 - \frac{\alpha}{2} q_m\right) \right), \\
Term4 &= \left(2q_m^3 + q_m^2 * \ln\left(-\frac{q_m}{\frac{2}{\alpha} - q_m}\right) \right), \\
Term5 &= \left(2q_{md}^2 + q_{md} * \ln(-q_{md}) - q_{md} * \ln\left(\frac{2}{\alpha} - q_{md}\right) \right).
\end{aligned}$$

REFERENCES

1. **Reyboz M., Martin P., Poiroux T., Rozeau O.** Continuous model for independent double gate MOSFET// Solid-State Electron.- 2009.-53(5). - P. 504–513.
2. **Tang M.** Etude et modélisation compacte du transistor FinFET: Ph.D. Thesis.- University of Strasbourg.- December, 2009.
3. **Lime F., Iníguez B., Moldovan O.** A quasi-two-dimensional compact drain current model for undoped symmetric double-gate MOSFETs including short-channel effects// IEEE Trans Electron Dev.- 2008.-55(6).- P.1441–1448.
4. A design oriented charge-based current model for symmetric DG MOSFET and its correlation with the EKV formalism /**J.-M. Sallese, F. Krummenacher, F. Prégaldiny**, et al // Solid-State Electron.- 2005.-49(3). -P.485–489.
5. Physics-based compact model for ultra-scaled FinFETs / **A. Yesayan, F. Pregaldiny, N. Chevillon** et al // Solid-State Elec.-2011.-Vol.62.- P. 165-173.
6. **Ward D. and Dutton R.** A charge-oriented model for MOS transistor capacitances// IEEE J. Solid State Circuits.-Oct.1978.- Vol. SSC-13, no. 5.- P. 703-708.
7. **Arora N.** MOSFET Modeling for VLSI simulation: theory and practice.- World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.

Institute of Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences Armenia.
The material is received 20.07.2018.

Ա.Է. ԵՍԱՅԱՆ

**ԵՐԿՓԱԿԱՆԻ, ԿԱՐՃ ՈՒՂԵՏԱՐՈՎ ՖԻՆՖԵՏ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԻ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ
ՍՈՂԵԼԸ ՇԱՐԺՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԴԵԳՐԱՂԱՑԻԱՅԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Ներկայացված է կարճ ուղետարով երկփականի ֆինֆեՏ տրանզիստորի ունակության մոդելը, որտեղ հաշվի է առնված լիցքակիրների շարժունակության դեգրադացիան: Ունակության մոդելը հիմնված է ուղետարի լիցքի տերմինալների միջև բաժանման գաղափարի վրա և հանդիսանում է հաստատուն շարժունակության համար նախկինում մշակված մոդելի ընդհանրացումը: Անալիտիկ հաշվարկների ճշգրտությունը ստուգված է 2D Atlas ստանդարտացված թվային գործիքով, որտեղ հաշվարկները կատարված են CVT շարժունակության մոդելով:

Առանցքային բառեր. DGFinFET/MOSFET, ունակության մոդել, շարժունակության դեգրադացիա, կարճ ուղետարի էֆեկտ, կոմպակտ մոդել:

Ա.Յ. ЕСАЯН

**МОДЕЛЬ ЕМКОСТИ КОРОТКОКАНАЛЬНОГО ФИНФЕТА С ДВОЙНЫМ
ЗАТВОРОМ, ВКЛЮЧАЯ ЭФФЕКТ ДЕГРАДАЦИИ ПОДВИЖНОСТИ**

Исследован короткоканальный, нелегированный FinFET полевой транзистор с двойным затвором. Разработана компактная модель емкости структуры, включая эффект деградации подвижности. Достоверность аналитических расчетов проверена сравнением с численными вычислениями с 2D Atlas инструментом с учетом CVT модели подвижности.

Ключевые слова: DGFinFET/MOSFET, модель емкости, деградация подвижности, короткоканальный эффект, компактная модель.

A.A. DAVTYAN

I/V CHARACTERISTICS OF A FERROELECTRIC NANOFILM TOWARDS THE HYDROGEN PEROXIDE STEAM

The I/V characteristics of ferroelectric (barium-strontium titanate, BST) nano-film - based Pt-BST-Pt structure in the environment of the hydrogen peroxide (H_2O_2) steam in the temperature range of $t=36...42^\circ C$ and densities of H_2O_2 (0% (distilled water), 0,5%, 1%, 1,5% and 3%) is experimentally studied. It is justified that the BST membrane shows good sensitivity that can be used for the rapid and early invasive diagnosis of respiratory diseases. Sensitivity mechanisms are also proposed and discussed.

Keywords: ferroelectric BST thin film, diagnosis of respiratory diseases, I/V dependencies, H_2O_2 concentration high sensitivity.

Introduction. As we have already mentioned in our previous study [1], the concentration of non-vaporizing substances that are excreted in healthy individuals is quite low, but it is significantly increasing in patients with pulmonary-asthmatic diseases [2-4]. When a person has lung inflammation, white blood cells release hydrogen peroxide and other chemical elements to kill the harmful bacteria in the body. In addition to pulmonary diseases, smoking also causes inflammatory reactions in the respiratory tract, in other words, the H_2O_2 concentration also increases. Thus, the H_2O_2 concentration in the exposed air can be a very important indicator for the diagnosis of the lung condition and respiratory diseases of different types for the first time.

On the other hand, due to their specific dielectric, piezoelectric, pyroelectric, electrooptical properties, ferroelectric, ceramics and thin film structures have long been used as passive elements of microelectronic schemes, microwave voltage-controlled capacitors (varactors), Film Bulk Acoustic Wave Resonators (FBARs), microelectromechanical systems (MEMS), electro-optic modulators, etc. [5, 6]. At present, various constructions based on these materials are tested as high density DRAMs (dynamic random access memories), non-volatile FeRAMs (ferroelectric random access memories), ferroelectric FETs (field-effect transistor) [7, 8].

Numerous theoretical and experimental studies have shown that in the crystal structure of ferroelectrics, as a result of the inevitable presence of oxygen vacancies, their thin films exhibit chemical catalytic great activity with respect to hydrocarbons [9, 10], hydrogen [11], ethanol [12], acetone [13], moisture [14], ammonium [15], pH of bio(chemical) medium [16, 17], conductivity of electrolytic

solutions [18, 19], hydrogen peroxide vapor [20-22], and has perspectives in biological and chemical sensors in terms of application.

Taking into account the fact that barium-strontium titanium in the family of ferroelectric materials is the most researched and applicable, the goal of this paper is to present the sensitivity properties of BST nano-film of a Pt-BST-Pt structure with respect to hydrogen peroxide vapor (0% density (distilled water), 0.5%, 1%, 1.5% and 3% of H_2O_2 in the temperature range (36...42°C)) for the first time.

Experimental results. The study is carried out in terms of I/U dependencies in the interval of the applied DC voltages between $-19V...+19V$, in cases of different concentrations and temperatures of steam H_2O_2 . Studies are carried out towards heterojunction structures shown in Fig.1, on horizontal x-direction of Pt-BST-Pt, the sensitive upper layer of which is the ferroelectric $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ nano-film, formed by the pulsed laser deposition method.

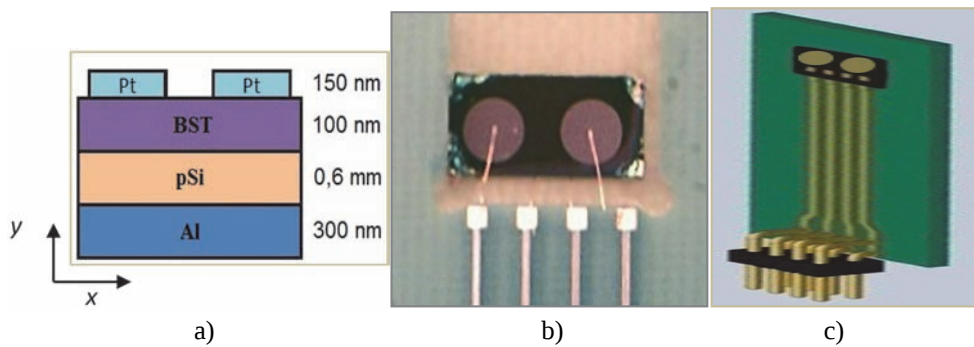


Fig.1. a- The cut of the BST/Si hetero-samples, b- the look above, c- the final appearance of the sample

The investigations were carried out at National Polytechnic laboratory of Armenia “ANEL” (Armenian National Engineering laboratory-ANEL). The NI PXI2-SLOT6 measuring device was used to measure the current. To measure the temperature the NI78-4353 measuring device was used to which the J-type thermocouple was connected. It works at a temperature of 0...760°C, accuracy $\pm 2.2^\circ C$ or 0.75%, and the limit of permissible error is $\pm 1.1^\circ C$ or 0.4%. The J-type thermocouple is well attached to an oxidizing environment.

The experiments were carried out for the following concentrations of H_2O_2 : 0% (distilled water), 0.5%, 1%, 1.5% and 3%. In the case of all densities, the same temperature limit was applied (36...42°C). The measurement results were saved both in tabular and in graphical form. The H_2O_2 solution was heated to those temperatures so that on the friction surface with the membrane the temperature of the vapor H_2O_2 was in the mentioned interval. The table below shows the change in

the current between Pt-contacts in the range of the applied DC voltages of $-19V \dots +19V$, and the results of individual modes are shown in Fig's.2-4.

Table

T, °C H ₂ O ₂ , %	36°C, I (mA)	40°C, I (mA)	42 °C, I (mA)
0 (H ₂ O)	-15...14	-18...18	-18...22
0,5	-9...13	-11...18	-15...24
1	-11...13	-16...18	-30...23
1,5	-8...10	-12...17	-30...22
3	-6...10	-10...14	-30...17

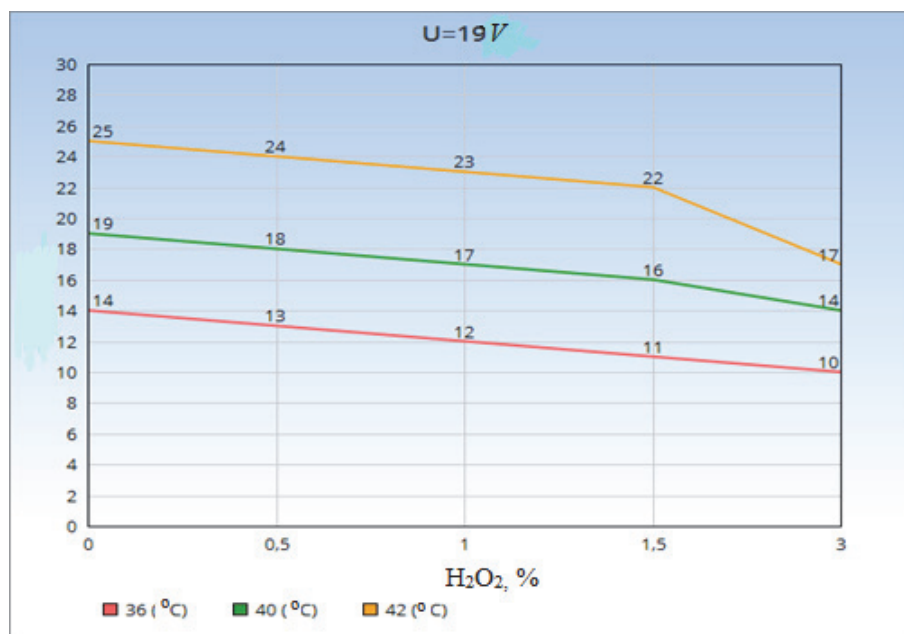


Fig. 2. Dependence of current on the H_2O_2 vapor concentration for different temperatures

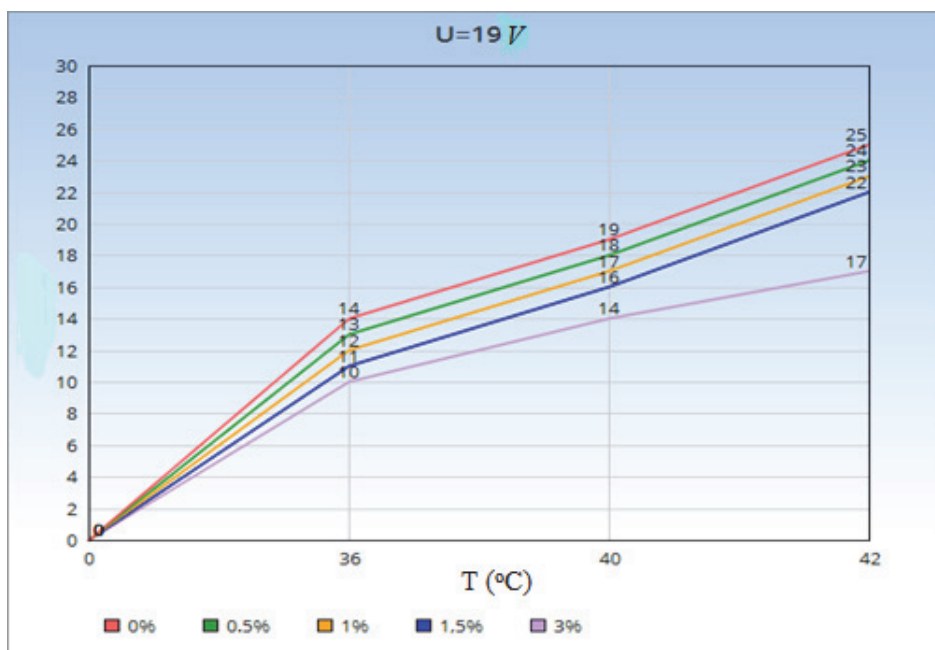


Fig.3. Dependence of current on temperature for different densities of the H_2O_2 vapor

Discussion of the results and the model description. From the obtained results, it is obvious that in parallel with the increase in the concentration of hydrogen peroxide, the sensor current decreases, and the reduction function is close to linear. The other result is as follows: in the case of a constant concentration of hydrogen peroxide, with the increase in the vapor temperature, the current also increases. First of all, a decrease in current is equivalent to an increase in the sensor resistance. Such a recall of the sensor parameters can be explained by a change in the density of oxygen vacancies which inevitably exist in ferroelectric membranes, as well as by new phenomena cases to change the electrical "activity" of trapping energetic levels in the forbidden bands of ferroelectrics which arise due to the presence of these oxygen vacancies [23-25]. First, it has long been approved by experimental and theoretical studies that all complex metal-oxide materials inevitably contain various defects in the crystal network, including the oxygen vacancies, which have the greatest density and affect the material's electro-physical parameters [23, 24].

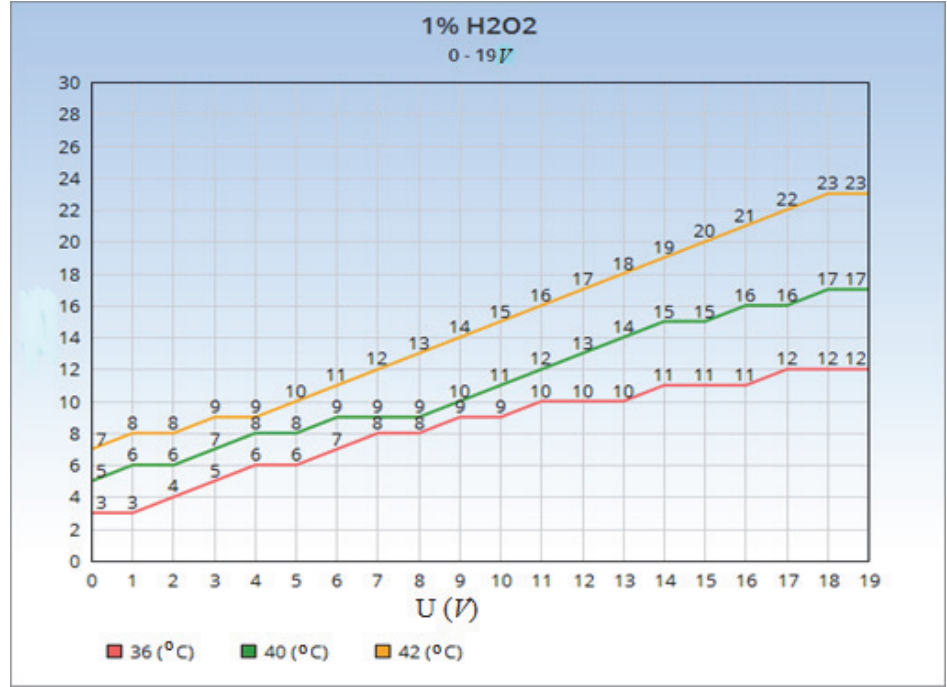


Fig.4. The I/V characteristics of the sensor for different temperatures (1% H₂O₂ vapor)

On the other hand, it was justified that oxygen vacancies in ferroelectric materials exhibit a behavior that is inherent in donor impurities known from the physics of semiconducting materials, give an n-type conductivity to the ferroelectrics. At high temperatures, the oxygen vacancies are double ionized, each supplying two electrons to the conduction band. This process at a low oxygen partial pressure can be described as: $O_0 \leftrightarrow \frac{1}{2}O_2(gas) + V_0'' + 2e^-$. An interstitial

oxygen atom can form different types of defects $x = O^0, O^-, O^{2-}$ which means, that the triplet states of oxygen corresponds to three different energies of the ferroelectric film. Since the interface with electrodes is poor in O^{2-} , these interfacial layers have n – type conductivity.

In this sense, oxygen vacancies are positively charged centers, which can attract electrons and be replaced with a conduction band. The energy levels corresponding to these "donor" centers, from conduction band edges have an energy distance $E_c - E_t = 0.06...0.4eV$, and the density of the oxygen vacancies, depending on the characteristics of different technologies, vary from 10^{14} to $10^{18}cm^{-3}$ [25] (Fig. 5).

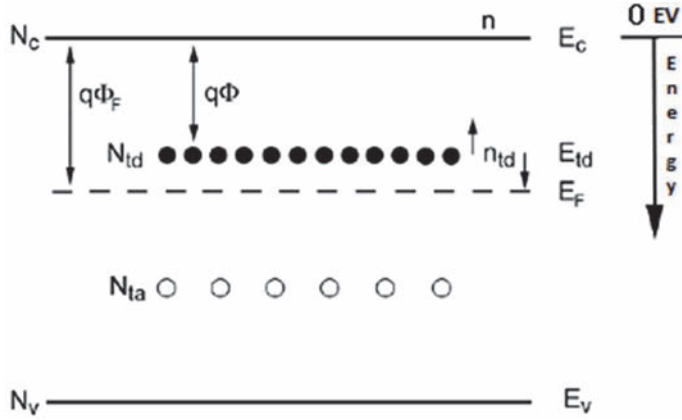


Fig. 5. Schematics of trap levels for electrons

From the point of view of electrical charge, an oxygen vacancy can be in different states, like donors in classical materials. A donor atom is neutral when it attracts an electron, it is positively charged when the corresponding electron is in the conduction band in a free state. Since oxygen is bivalent, its absence is equivalent to a double positively charged center. An oxygen vacancy is said to be neutral if two electrons, the corresponding ones, are occupied in the energy trap levels or in the conduction band, and this will be considered a positively charged unit, if it corresponds to one electron in the conduction band and trap. An oxygen vacancy will be considered a double positively charged center, if in the conduction band or at the trap levels there are no two necessary electrons that retain electro-neutrality. That is, an oxygen vacancy can act as a neutral center, causing the corresponding energy levels in the forbidden band to attract and replace electrons.

Now, based on the abovementioned, we propose two electrophysical versions (model/mechanism) for explanation the change in the resistance (current) of a sample, experimented under the influence of hydrogen peroxide, according to the aforementioned energy structure. However, it is worthwhile to notice that in terms of defect properties of BST, the experimental results are mainly explained by a model in which oxygen vacancies are the key defects responsible for the conductivity behavior of this material [6, 7, 22, 23]. The essence of the first physical model is as follows. At a temperature above room temperature, as it is known, hydrogen peroxide decomposes into water vapor and oxygen atoms $2H_2O_2 = 2H_2O + 2O^\cdot$.

On the other hand, atomic oxygen, at almost all temperatures, is a strong oxidizing agent. Before the contact with the exhaled steam, that is, in a relaxed state, the double positive charge is replaced (neutralized) by the existing free electrons at the "trap" E_t levels (Fig.5).

At temperatures above room temperature, in the exhale of a sick person, oxygen O^- atoms, approaching the BST surface, as atoms endowed with high oxidative qualities, are removed from the shell of the existing oxygen atom, and joining them, disappear in the form of molecular oxygen. As a result, new vacancies of oxygen appear in the BST layer, for neutralization of which the elementary BST cell from the conduction band draws electrons and keeps them "at the trap levels" as a binding state. Thus, the BST cell retains its electrical neutrality.

As it is well known, the charge current located at the "trap levels" do not participate in electrical conductivity, and as a result, the resistance of the film increases, and the current decreases other conditions being equal. Consequently, the higher is the density of hydrogen peroxide, the more often oxygen vacancies will occur and the resistance will increase, and as a result, the current drops significantly (Fig.2).

Another version of this I/V dependence is as follows. Adsorption of O^- ions at the BST surface will cause a net surface charge. As a consequence of this surface charge, a space charge region is induced in the interface region of the BST that balances the charge at the surface [28]. In our case, the adsorbed negative charge of O^- will lead to the creation of a positively charged space charge in the BST interfacial region that leads to a change in the charge carrier chemical potential (i.e. a shift in the Fermi level) and thus a decrease in the charge carrier's concentration, and a decrease of conductivity occurs which, in turn, is observed experimentally.

The second experimental result is as follows. For the constant density of hydrogen peroxide in vapor and fixed applied voltages, the current of BST film increases with the increase of temperature. This dependence can also be explained within the framework of the aforementioned model, if we take into account another phenomenon, very well known in solid state physics, studied and approved: the Pool-Frenkelionization from the "trap" levels [26, 27] (Fig. 6) and Schottky barrier thermo ionization mechanisms.

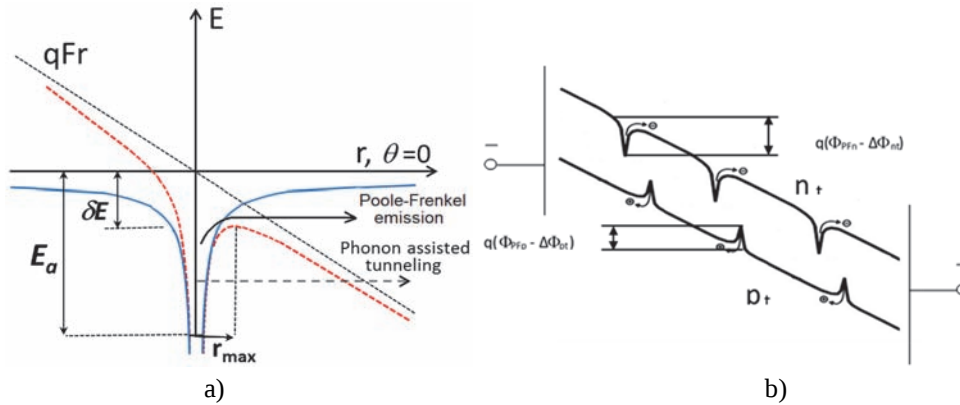


Fig.6. One-dimensional representation of the Coulomb attractive potential (solid line) at the defect state E_a and its changes in the presence of a uniform electric field E (dashed line)

The modification of the carrier emission process by the Poole-Frenkel effect (barrier lowering by ΔE) and by phonon-assisted tunnelling is shown (a), and lowering of the barriers by $\Delta\Phi_n$ for electrons and $\Delta\Phi_p$ for the holes under the applied field (b) [26, 27].

The physical essence of this phenomenon is as follows. The electrons which are “trapped” in the forbidden bands energy levels under the influence of different external electric, thermal, optical and other fields acquire the necessary energy to overcome the potential barrier of a “trap” center, then they can go from these “binding” condition to the conducting band, become free electrons and participate in conduction. In the case under discussion, an increase in temperature may lead to an increase in the possibility of such ionization processes, and as a result, the current will increase, which is noticeable from our experiments.

Conclusion. According to the results of the experiments, the ferroelectric BST thin film exhibits sufficient sensitivity with respect to vapor of hydrogen peroxide, and this can be used for the rapid and early invasive diagnosis of respiratory diseases due to its high sensitivity and emphasized sensorial qualities.

REFERENCES

1. **Buniatyan V.V., Davtyan A.A., Begoyan L.K.** The sensitivity of ferroelectric nanomembrane towards the vapor of hydrogen peroxide // Proceed. of Engineering Academy of Armenia (PEAA). –2017. –V.14. –P. 460-465.
2. **Knobloch H., Becher G., Decker M., Reinhold P.** Evaluation of H_2O_2 and pH in exhaled breath condensate samples: methodical and physiological aspects // Biomarkers. –2008. –13 –P. 319-341.
3. Reasons for Delay in Seeking Care for Tuberculosis / **D. Schneider, S.J.N. McNabb, M. Safaryan, et al** // Republic of Armenia, 2006–2007, Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases, Article ID 412624, 2010.

4. An efficient and reproducible method for measuring hydrogen peroxide in exhaled breath condensate / **W.J.C. van Beurden, G.A. Harff, P.N.R. Dekhuijzen, et al** // *Respir. Medicine*. –2002. –96. –P. 197-203.
5. **Gevorgian S.Sh., Tagantsev A.K., Vorobiev A.K.** Tunable Film Bulk Acoustic Wave Resonators. –Springer-Verlag, London, 2013. – 243p.
6. **Dawber M., Raba J.F., Scott J.F.** Physics of thin-film ferroelectric oxides // *Rev. of Modern Phys.* –2005. – V.77. –P. 1083-1130.
7. **Waser R.** Nanoelectronics and information technology: advanced electronic materials and novel devices. – Wiley, Berlin, 2005.– 995p.
8. **Ishiwara H.** Current Status and Prospects of FET-type Ferroelectric Memories // *Journal of Semiconductor Technology and Science*. –2001. –Vol.1, №1. –P. 1-14.
9. **Logothetis E.M.** CO/HC sensors based on thin films of LaCoO_3 and $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CoO}_3$ metal oxides // *Sens. Actuators B*. –2000. –69. –P. 171-182.
10. **Sahner K., Moos R.** Modeling of hydrocarbon sensors based on p-type semiconducting perovskites // *Physical Chemistry Chemical Physics*. –2007. – 9. –P. 635-642.
11. Microstructure and hydrogen gas sensitivity of amorphous (Ba, Sr) TiO_3 thin film sensors / **W. Zhu, O.K. Tan, Q. Yan, et al** // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2000. – 65, №1-3. –P. 366-370.
12. A high performance ethanol sensor based on field-effect transistor using a LaFeO_3 nano-crystalline thin-film as a gate electrode / **S. Zhao, J.K.O. Sin, B. Xu, et al** // *Sens. Actuators B*. –2000. – 44. – P. 83-88.
13. Acetone gas sensing properties of $\text{SmFe}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$ perovskite oxides / **X. Liu, J. Hu, B. Cheng, et al** // *Sens. Actuators B*. – 2008. – 134. – P. 483-487.
14. **Agarwal S., Sharma G.L.** Humidity sensing properties (Ba, Sr) TiO_3 thin films grown by hydrothermal-electrochemical method // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2002. – 85. –P. 205-211.
15. Novel ammonia-sensing phenomena in sol-gel derived $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films / **S.C. Roy, G.L. Sharma, M.C. Bhatnagar, et al** // *Sensors and Actuators B: Chemical*. –2005. – 110, №2. –P. 299-302.
16. A new perovskite phase $\text{Li}_{2x}\text{Ca}_{0.5-x}\text{TaO}_3$: Li^+ ion conductivity and use as pH sensor / **Q.N. Phan, C.B. Bohnke, J. Emery, et al** // *Solid State Ionics*. –2005. – V.176. – P. 495-504.
17. pH-sensitive properties of barium strontium titanate (BST) thin films prepared by pulsed laser deposition technique / **V.V. Buniatyan, M.H. Abouzar, N.W. Martirosyan, et al** // *Physica Status Solidi A*. –2010. – 207. – P. 824-830.
18. Multi-parameter sensing using high- k oxide of barium strontium titanate / **C. Huck, A. Poghossian, M. Bäcker, et al** // *Phys. Status Solidi A*. –2015. – 212, №6. – P. 1254-1250.
19. Capacitively coupled electrolyte-conductivity sensor based on high- k material of barium strontium titanate / **C. Huck, A. Poghossian, M. Schoening, et al** // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. –31. – P. 102-109.

20. Combined amperometric/field-effect sensor for the detection of dissolved hydrogen / **C. Huck, A. Poghosian, P. Wagner, M.J. Schöning** // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – doi:10.1016/j.snb. – 2012.10.050.
21. Multi-sensor chip for the investigation of different types of metal oxides for the detection of H₂O₂ in the ppm range / **S. Reisert, B. Schneider, H. Geissler, et al** // Phys. Status Solidi A. – 1–7 (2013) / DOI 10.1002/pssa. –201200930.
22. Towards a multi-sensor system for the evaluation of aseptic processes employing hydrogen peroxide vapor (H₂O₂) / **S. Reisert, H. Geissler, et al** // Phys. Status Solidi A 208. – 2011. – №6. – 1351–1356. – / DOI 10.1002/pssa. – 201001138.
23. **Wang R.-V. and McIntyre Paul C.** Point defect distributions and their electrical effects on (Ba,Sr) TiO/Pt thin films // J Appl.Phys. –2003. – V. 94, №3. – P. 1926-1932.
24. **Robertson J.** Energy levels of point defects in SrTiO₃ and related oxides // J.Appl. Phys. – 2003. – V. 93, №2. – P. 1054-1059.
25. **Buniatyan V.V., Martirosyan N.W., Vorobiev A., Gevorgian S.** Dielectric model of point charge defects in insulating paraelectric perovskites // Journal of Applied Physics. – 2011. – 110. – P. 094110-1-11.
26. **Mitrofanov O. and Manfa M.** Pool-Frenkel electron emission from the traps in AlGaIn/GaN transistors // J. Appl. Phys. –2004. – V.95. – P. 6414-6419.
27. **Antula J.** Hot-electron concept for Poole-Frenkel conduction in amorphous dielectric solids // J. Appl. Phys. – 1972. – V.94, №11. – P. 4663-4668.
28. **Modou M.J., Morrisison S.R.** Chemical Sensing with Solid State Devices. – Acad. Press., Boston, 1989. –468p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 11.02.2019.

Ա.Ա. ՂԱՎԹՅԱՆ

ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԻ I/V ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ ԶՐԱԾՆԻ ՊԵՐՕՔՍԻԴԻ ԳՈԼՈՐՇՈՒ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ

Փորձնականորեն ուսումնասիրվել են ֆերոէլեկտրական նանոթաղանթի (բարիում-ստրոնցիում-տիտանատ՝ BST) վրա հիմնված Pt-BST-Pt կառուցվածքի I/V բնութագրերը $t=36...42^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանային միջակայքում՝ տարբեր խտությամբ ջրածնի պերօքսիդի (0% (թորած ջուր), 0,5%, 1%, 1,5% եւ 3% H₂O₂) գոլորշիների առկայությամբ: Պարզվել է, որ BST թաղանթը դրսևորում է բարձր զգայնություն: Նանոթաղանթի այդ հատկությունը կարող է օգտագործվել շնչառական հիվանդությունների արագ և վաղ ախտորոշման համար: Առաջարկվել և քննարկվել են նաև զգայնության մեխանիզմները:

Առանցքային բառեր. ֆերոէլեկտրական BST նանոթաղանթ, շնչառական հիվանդությունների ախտորոշում, I/V բնութագրեր, ջրածնի պերօքսիդի խտություն, բարձր զգայնություն:

А.А. ДАВТЯН

**I/V ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАНОПЛЕНКИ В
СРЕДЕ ПАРОВ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА**

Экспериментально исследованы I/V характеристики ферроэлектрической (титанат бария-стронция, BST) нанопленки на основе структуры Pt-BST-Pt в среде паров пероксида водорода (H_2O_2) в интервале температур $t=36...42^\circ C$ и плотности H_2O_2 (0% (дистиллированная вода), 0,5%, 1%, 1,5% и 3%). Выявлено, что мембрана BST демонстрирует хорошую чувствительность. Это свойство может быть использовано для быстрой и ранней инвазивной диагностики респираторных заболеваний. Предложены и обсуждены механизмы чувствительности.

Ключевые слова: ферроэлектрические BST нанопленки, диагностика респираторных заболеваний, I/V характеристики, плотность H_2O_2 , хорошая чувствительность.

Т.Р. МЕЛКОНЯН, Г.С. СУКИАСЯН, А.Н. БАБАЯН
О ПОСТРОЕНИИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ
АППРОКСИМАЦИИ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ
С ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКОЙ

Разработан алгоритм автоматизированного построения силовых линий кусочно-линейной аппроксимации двумерной непрерывной функции. Области линейности аппроксимируемой двумерной функции образуют треугольную сетку. При этом минимизируется погрешность аппроксимации при заданном числе сеточных узлов, а проекция графика кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции образует триангуляцию Делоне. Разработанный подход апробирован на модели двумерной параболической функции.

Ключевые слова: кусочно-линейная аппроксимация, нерегулярная решетка, триангуляция Делоне.

Введение. В прошлом веке при численном решении задач математической физики в основном использовались регулярные сетки, состоящие из прямоугольников [1]. По мере развития метода конечных элементов все чаще стали пользоваться треугольными сетками. Основное преимущество треугольных сеток в том, что с их помощью можно аппроксимировать геометрические фигуры любой конфигурации. А это чрезвычайно важно в задачах, где исследуемая область состоит из подобластей с различными физическими характеристиками и границы раздела сред не являются прямоугольными.

Другим преимуществом треугольных сеток перед прямоугольными является возможность варьировать густоту узлов в различных участках исследуемой области. Однако этой возможностью почти не пользовались. В основном использовались регулярные сетки, узлы которых были равномерно распределены внутри исследуемой области.

При численном решении нелинейных задач математической физики часто пользуются сеточными методами, например, методом конечных элементов. Отметим две особенности сеточных методов: внутри ячеек сетки искомая функция принимается линейной (а следовательно, во всей исследуемой области искомая функция принимается кусочно-линейной), и решение задачи сводится к решению системы уравнений с несколькими неизвестными, причем количество уравнений равно числу внутренних узлов сетки.

Так как в современных задачах зачастую решаются уравнения с огромным числом неизвестных (порядка нескольких тысяч), точное аналитическое решение которых затруднительно, то приходится решать такие системы приближенными методами [2].

При этом возникают два типа погрешностей: погрешность первого рода, вызванная заменой нелинейной функции кусочно-линейной, и погрешность второго рода, вызванная приближенным характером процесса решения системы уравнений. При изменении числа узлов сетки эти погрешности ведут себя по-разному. С увеличением числа узлов в сетке погрешность первого рода уменьшается. Но с другой стороны, чем больше узлов в сетке, тем больше и уравнений в системе, что вызывает увеличение погрешности второго рода.

Достичь разумного баланса этих двух типов погрешностей, чтобы не допустить катастрофического увеличения ни одной из них, помогают треугольные динамические сетки, число узлов которых меняется по ходу решения задачи. Там, где функция медленно меняется, густота сеточных узлов относительно невелика, а где функция быстро меняется, густота сеточных узлов динамически растет.

Стремление уменьшить число сеточных узлов приводит к необходимости перехода от общепринятых равномерных решеток к нерегулярным сеткам [3–6]. В [7] было предложено применять в качестве двумерной треугольной сетки триангуляцию Делоне. В [8] отмечено, что для фиксированного набора узлов оптимальной сеткой (в смысле сходимости процесса последовательных приближений) является триангуляция Делоне. В [9] показано, что на процесс последовательных приближений к численному решению двумерной задачи нахождения векторного магнитного потенциала отрицательно влияет наличие тупых углов у треугольных сеток.

В [4] был предложен алгоритм автоматического построения кусочно-линейной аппроксимации с неравномерной решеткой для одномерной функции. Алгоритм минимизировал погрешность аппроксимации при заданном числе точек решетки. В [10] одномерный алгоритм, предложенный в [4], обобщен для случая двумерной функции. При этом проекция графика кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции образует триангуляцию Делоне.

В ходе работы алгоритмов автоматического построения кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции накапливается информация о треугольной сетке, служащей базисом для кусочно-линейной аппроксимации. В частности, образуются массивы данных о положении вершин треугольных сеток, о треугольниках, примыкающих к данному узлу, о ребрах, выходящих из данной вершины, и т.д.

В настоящей работе предложено использовать эти массивы данных для быстрого построения силовых линий приближаемой функции. При этом минимизируется погрешность аппроксимации при заданном числе сеточных узлов, а проекция графика кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции образует триангуляцию Делоне.

Сетки Делоне. Напомним определение триангуляции Делоне [11]. Пусть на плоскости задано конечное множество точек $M_k = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$. Множество треугольников $\{T_j\}$ называется сеткой Делоне с системой узлов M_k , если выполнены следующие условия:

- 1) внутренности треугольников попарно не пересекаются;
- 2) вершины всех треугольников принадлежат M_k ;
- 3) объединение треугольников заполняет выпуклую оболочку точек M_k ;
- 4) для каждого треугольника T_j внутри описанного вокруг него круга нет ни одной точки из M_k .

Сетку Делоне с системой узлов M_k будем обозначать через $D(M_k)$. В [11] доказано, что для любого конечного множества точек M_k можно построить сетку $D(M_k)$ (иногда не единственным образом).

Силовые линии для одного треугольника. Пусть на плоскости задан треугольник $T = \Delta P_1 P_2 P_3$ с вершинами P_i , имеющими декартовы координаты (x_i, y_i) , $i=1,2,3$. Рассмотрим функцию $z=f(x,y)$, линейную внутри треугольника T . Полагаем, что заданы также значения z_i аппроксимируемой функции $f(x,y)$ в вершинах P_i , т.е. $z_i=f(x_i, y_i)$, $i=1,2,3$.

Обозначим через $Z_{\max}$ наибольшее, а через $Z_{\min}$ - наименьшее из значений z_i , $i=1,2,3$. Полагаем, что $Z_{\max} > Z_{\min}$. Построим силовую линию L_t уровня t , $Z_{\min} < t < Z_{\max}$, т.е. множество точек (x,y) таких, что $f(x,y) = t$. Так как функция $f(x,y)$ является линейной внутри треугольника T , то кривая L_t является прямолинейным отрезком.

В качестве первого шага найдем, какие стороны треугольника T пересекает отрезок L_t . Для этого сравним с нулем величины

$$w_{12} = (z_1 - t)(z_2 - t) \text{ и } w_{13} = (z_1 - t)(z_3 - t).$$

Если $w_{12} > 0$, то отрезок L_t не пересекается со стороной $P_1 P_2$, а значит, пересекает стороны $P_1 P_3$ и $P_2 P_3$. Если $w_{12} < 0$, $w_{13} > 0$, то отрезок L_t пересекает стороны $P_1 P_2$ и $P_2 P_3$. Если же $w_{12} < 0$, $w_{13} < 0$, то отрезок L_t пересекает стороны $P_1 P_2$ и $P_1 P_3$.

Пусть отрезок L_t пересекает сторону $P_i P_k$. Декартовы координаты (x_t, y_t) точки пересечения отрезка L_t со стороной $P_i P_k$ определяются при помощи формул

$$x_t = \lambda x_i + (1 - \lambda) x_k \text{ и } y_t = \lambda y_i + (1 - \lambda) y_k, \text{ где } \lambda = (z_k - t) / (z_k - z_i).$$

Силовые линии для сетки треугольников. Пусть на плоскости задана сетка треугольников $\{T_j\}$ и функция $z=f(x,y)$ линейная внутри каждого треугольника T_j . Полагаем, что заданы также значения z_i аппроксимируемой функции $f(x,y)$ в узлах сетки, т.е. в вершинах P_i всех треугольников, $z_i=f(x_i,y_i)$.

Обозначим через $Z_{\max}$ наибольшее, а через $Z_{\min}$ - наименьшее из значений z_i . Построим силовую линию L_t уровня t , $Z_{\min} < t < Z_{\max}$, т.е. множество точек (x,y) таких, что $f(x,y) = t$. Так как функция $f(x,y)$ является линейной внутри каждого треугольника T_j , то кривая L_t получится ломаной, состоящей из прямолинейных отрезков.

Численные результаты. На рис. 1 представлен пример кусочно-линейной аппроксимации для функции $F(x,y)=0,457x^2+0,382y^2$ на прямоугольнике $[a,b] \times [c,d]$, причем $a=0$, $b=6$, $c=0$, $d=6$. Число узлов n равно 100.

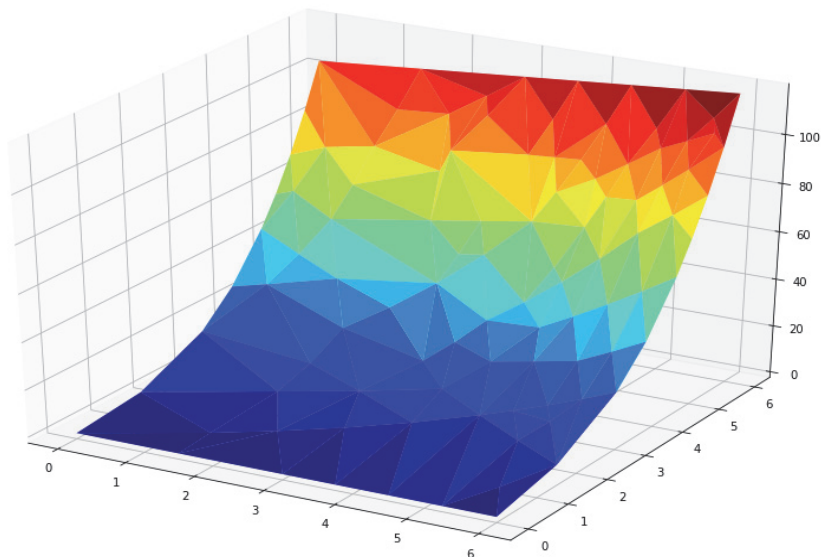


Рис. 1. Пример кусочно-линейной аппроксимации

На рис. 2 представлена треугольная сетка Делоне, получающаяся проектированием. Наглядно видно, что интенсивность сеточных узлов в разных участках двумерной сетки существенно разная.

На рис. 3 изображены полученные линии уровня, наложенные на треугольную сетку.

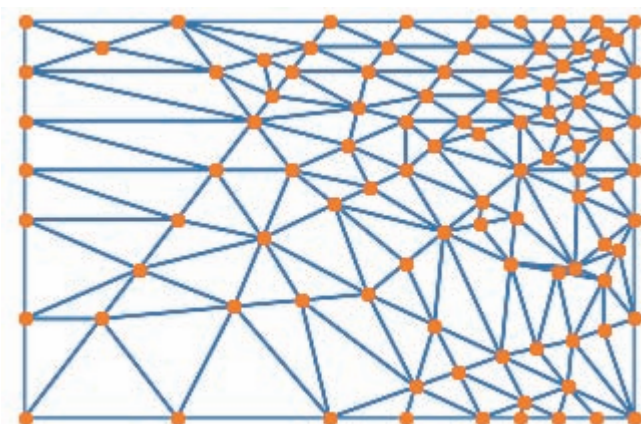


Рис. 2. Соответствующая треугольная сетка Делоне

Как видно из рис. 3, в левом нижнем углу, где функция $F(x,y)$ медленно меняется, густота сеточных узлов относительно невелика. А в правом верхнем углу, где наблюдается быстрое изменение функции, интенсивность сеточных узлов возрастает, и треугольники становятся мелкими. Четко соблюдается условие: густота сеточных узлов тем больше, чем сильнее меняется функция.

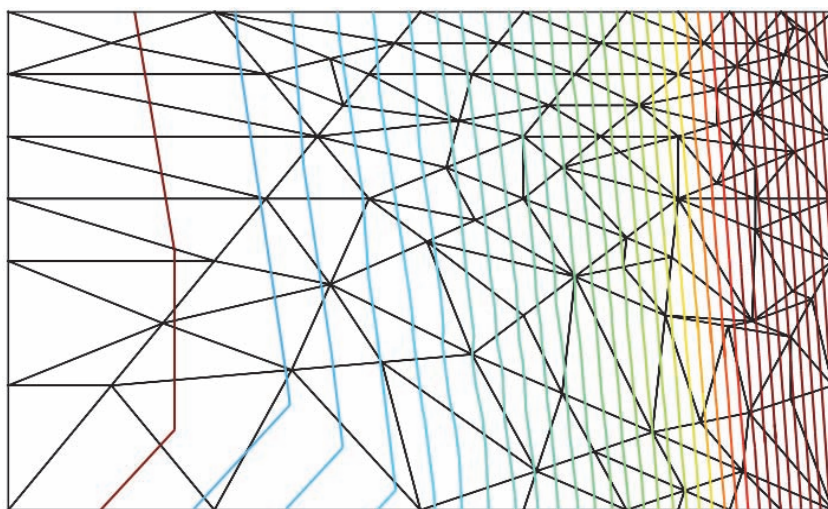


Рис. 3. Линии уровня, наложенные на треугольную сетку

Заключение. Развита и реализован алгоритм автоматического построения кусочно-линейной аппроксимации двумерных функций с нерегулярной сеткой. Алгоритм минимизирует погрешность аппроксимации при заданном числе сеточных узлов. Разработанный подход реализован на модельной задаче аппроксимации двумерной параболической функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березин И.С., Жидков Н.П.** Методы вычислений. - М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.- 464с.
2. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Мелконян Т.Р.** О зависимости эффективности случайного поиска от размерности пространства при оптимизации электрических машин // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.-2016.- Т.69, N 3.- С. 296-303.
3. **Сукиасян Г.С., Енокян К.Р., Мелконян Т.Р., Оганнисян А.А.** Об автоматическом построении экономной аппроксимации решений краевых задач // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2017.- Т. 70, № 1.- С. 109-114.
4. **Енокян К.Р., Алаеи М.Е., Сукиасян Г.С.** Об автоматическом построении кусочно-линейной аппроксимации с нерегулярной решеткой // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2017.- Т. 70, № 4.- С. 409-414.
5. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С.** К оценке погрешности численного решения трехмерного уравнения Лапласа с нерегулярной сеткой // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2000. - Т. 53, №3. – С. 359-363.
6. **Боровиков С.Н.** Метод построения нерегулярных тетраэдральных расчетных сеток в произвольных трехмерных областях с криволинейными границами: Дис. ... д.т.н.- М., 2005.-192 с.
7. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** Об оптимизации сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58, № 3. - С. 570-578
8. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** Об углах треугольной сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2007. - Т. 60, № 3. - С. 523-532.
9. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** О расчете магнитных полей методом конечных элементов с динамической композицией элементов дискретизации // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58, № 2. - С. 332-339.
10. **Мелконян Т.Р., Сукиасян Г.С.** О кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции с нерегулярной сеткой // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2018.- Т. 71, № 1.- С. 80-85.
11. **Делоне Б.Н.** О пустоте сферы // Изв. АН СССР. ОМОН. – 1934.- № 4. - С.793–800.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.02. 2019.

Տ.Ռ. ՄԵԼԲՈՆՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Ա.Ն. ԲԱԲԱՅԱՆ

**ՈՒԺԱԳԾԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄ՝ ԵՌԱՆԿՑՈՒՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑՈՎ
ԵՐԿԶԱՓ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ԿՏՈՐ-ԳԾԱՅԻՆ ՄՈՏԱՐԿՄԱՄԲ**

Մշակված է երկչափ անընդհատ ֆունկցիայի կտոր-գծային մոտարկման ավտոմատացված կառուցման ալգորիթը: Մոտարկվող ֆունկցիայի գծային տիրույթները կազմում են ցանց, որը բաղկացած է եռանկյուններից: Ալգորիթը մինիմալացնում է մոտարկման սխալանքը ցանցի հանգույցների տրված թվի դեպքում, իսկ երկչափ ֆունկցիայի կտոր-գծային մոտարկման գրաֆիկի պրոյեկցիան կազմում է Դելոնեի եռանկյունապատում: Առաջարկված մոտեցումը փորձարկվել է երկչափ պարաբոլային ֆունկցիայի մոդելի վրա:

Առանցքային բառեր. կտոր-գծային մոտարկում, անկանոն ցանց, Դելոնեի եռանկյունապատում:

T.R. MELKONYAN, H.S. SUKIASYAN, A.N. BABAYAN

**CONSTRUCTING POWER LINES OF A PIECEWISE LINEAR
APPROXIMATION OF A TWO-DIMENSIONAL FUNCTION
WITH A TRIANGULAR GRID**

An algorithm for automated construction of power lines of a piecewise linear approximation of a two-dimensional continuous function with a triangular grid has been developed. At that, the approximation error is minimized for a given number of grid nodes. The projection of the graph of the piecewise linear approximation of a two-dimensional function forms a Delaunay triangulation. The developed approach has been tested on the model of a two-dimensional parabolic function.

Keywords: piecewise linear approximation, irregular grid, Delaunay triangulation .

Ф.П. ГРИГОРЯН

К СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ. II

В линейной интегродифференциальной стационарной системе уравнений рассмотрена одна задача синтеза оптимального управления, которая обеспечивает минимизацию расхода топлива самолета или космического корабля. Она решена с помощью одной задачи вариационного исчисления с подвижными границами, когда концы траектории движущейся материальной точки перемещаются по двум заданным поверхностям эллипсоидов.

Ключевые слова: синтез оптимального управления, интегродифференциальная стационарная система управления.

В настоящей работе рассматривается одна актуальная задача об оптимизации относительно системы интегродифференциальных уравнений (СИДУ).

Предполагается, что данная СИДУ с помощью синтеза с наперед заданным спектром приводится к устойчивой системе в заданном конечном промежутке $[t_0, T_1)$ ($T_1 < \infty$), согласно определению К.А. Абгаряна [1,2].

Поскольку данную систему можно стабилизировать с различными заданными спектрами, то выбирается тот спектр, который должен обеспечить минимальное значение рассматриваемого функционала.

1. В работе [3] рассматривается следующая стационарная управляемая СИДУ:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ u(t) = \int_{-\infty}^t g(t-t')v(t')dt', \Rightarrow \dot{x}(t) = Ax(t) + B \int_{-\infty}^t g(t-t')bx(t')dr', \\ v(t) = bx(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – столбцовая матрица размера $n \times 1$, вектор состояния процесса; $\dot{x}(t)$ – производная от $x(t)$ по времени t ; $x^T(t)$ – результат транспонирования; $u(t)$ – скалярное управляющее воздействие (рассматривается как выходной сигнал регулятора); $v(t)$ – скаляр, входной сигнал регулятора; $g(t-t')$ – импульсная переходная функция регулятора; t' – момент подачи входного сигнала; t – момент появления выходного сигнала, а также стационарные матрицы

$$A = (a_{ij}), (i, j = \overline{1, n}); B = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T; b = (b_1, b_2, \dots, b_n).$$

С учетом условий задачи синтеза, приведенных в работе [3], получается, что общее решение системы (1.1) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= WKexp(\Lambda t)C, \\ \Lambda &= diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где λ_i ($i = \overline{1, n}$) – наперед заданные различные числа; $C = (C_1, C, \dots, C_n)^T$ – столбец из произвольных постоянных;

$$W = (B, AB, \dots, A^{n-1}B),$$

$$K = (K_1, K_2, \dots, K_n), K_i = (\Delta_1(\lambda_i), \Delta_2(\lambda_i), \dots, \Delta_{n-1}(\lambda_i), \Delta_n(\lambda_i))^T, i = \overline{1, n},$$

$$\Delta_k(\lambda_i) = \lambda_i^{n-k} + \rho_1 \lambda_i^{n-(k+1)} + \rho_2 \lambda_i^{n-(k+2)} + \dots + \rho_{n-k}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, n}, \rho_0 = 1.$$

Приведем понятие устойчивости относительно заданной области, предлагаемое К.А. Абгаряном [1].

Определение. Если при достаточно малом $\rho > 0$ любое возмущение $x(t)$ процесса, начальное значение $x_0 = x(t_0)$ которого удовлетворяет условию

$$(S(t_0)x_0, S(t_0)x_0) \leq \rho^2, \quad (1.3)$$

в промежутке $t_0 \leq t < T_1$ удовлетворяет условию

$$(S(t)x(t), S(t)x(t)) \leq \rho^2, \quad (1.4)$$

где $S(t)$ – заданная ограниченная матрица, то невозмущенный процесс устойчив в промежутке $[t_0, T_1)$, ($T_1 < \infty$). В противном случае – неустойчив.

Известно, что решение (1.2) является траекторией подвижной точки в n -мерном фазовом пространстве [4].

Так как решение $x(t)$ зависит от числа λ_i ($i = \overline{1, n}$), значит, для различных групп получаются различные траектории движения – семейство кривых.

Поэтому возникает следующий вопрос: возможно ли выбрать из семейства кривых (траекторий) ту, которая доставляет минимальное значение расхода топлива [5].

Естественно ожидать, что такая траектория, которая обеспечивает наименьший расход топлива, должна иметь наименьшую длину.

Поэтому вопрос сводится к решению простейшей задачи вариационного исчисления [6,7].

Пусть в (1.2) обозначим

$$W = (s_{ij}), K = (k_{ij}), M = WK, M = (m_{ij}), i, j = \overline{1, n}, \det(WK) \neq 0. \quad (1.5)$$

Тогда (1.2) приводится к виду

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n C_i m_{1i} e^{\lambda_i t} \\ \sum_{i=1}^n C_i m_{2i} e^{\lambda_i t} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n C_i m_{ni} e^{\lambda_i t} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_1(t) = \sum_{i=1}^n C_i m_{1i} e^{\lambda_i t}, \\ x_2(t) = \sum_{i=1}^n C_i m_{2i} e^{\lambda_i t}, \\ \dots \\ x_n(t) = \sum_{i=1}^n C_i m_{ni} e^{\lambda_i t}. \end{cases} \quad (1.6)$$

Уравнения (1.6) являются параметрическими уравнениями траектории движения материальной точки, аргумент t называется переменным параметром [8].

С помощью выражения (1.2) преобразуем левую сторону (1.4) (скалярное произведение).

Вместо $S(t)$ возьмем

$$S(t) = (WK)^{-1}. \quad (1.7)$$

Подставим (1.7) в (1.4) и обозначим

$$V(t, x(t)) = ((WK)^{-1}x(t), (WK)^{-1}x(t)) \leq \rho^2, \quad (1.8)$$

отсюда

$$V(t, x(t)) = ((WK)^{-1}x(t))^* \cdot (WK)^{-1}x(t) \leq \rho^2,$$

где символ $*$ – сопряженная матрица [9].

Значит,

$$V(t, x(t)) = x^*(t)((WK)^{-1})^* \cdot (WK)^{-1}x(t) \leq \rho^2. \quad (1.9)$$

Легко проверить, что

$$((WK)^{-1})^* \cdot (WK)^{-1}$$

является эрмитовой матрицей. Действительно,

$$[((WK)^{-1})^* \cdot (WK)^{-1}]^* = [(WK)^{-1}]^* \cdot [((WK)^{-1})^*]^* = [(WK)^{-1}]^* \cdot (WK)^{-1},$$

т.е. все характеристические числа эрмитовой матрицы (1.10) в (1.9) являются вещественными числами.

Пусть

$$[(WK)^{-1}]^* \cdot (WK)^{-1} = \begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \dots & \Delta_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

С помощью матрицы (1.11) выражение (1.9) преобразуется к следующей квадратичной форме:

$$\begin{aligned}
V(t, x(t)) = & \Delta_{11}x_1(t)x_1(t) + \Delta_{12}x_1(t)x_2(t) + \dots + \Delta_{1n}x_1(t)x_n(t) + \\
& + \Delta_{21}x_2(t)x_1(t) + \Delta_{22}x_2(t)x_2(t) + \dots + \Delta_{2n}x_2(t)x_n(t) + \\
& \vdots \\
& + \Delta_{n1}x_n(t)x_1(t) + \Delta_{n2}x_n(t)x_2(t) + \dots + \Delta_{nn}x_n(t)x_n(t).
\end{aligned} \tag{1.12}$$

Приведем квадратичную форму (1.12) к каноническому виду методом Якоби [8-10].

При помощи метода исключения Гаусса приведем матрицу (1.11) к следующему виду [9]:

$$G_n = \begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} & \dots & \Delta_{1n} \\ 0 & \Delta_{22}^{(1)} & \Delta_{23}^{(1)} & \dots & \Delta_{2n}^{(1)} \\ 0 & 0 & \Delta_{33}^{(1)} & \dots & \Delta_{3n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta_{nn}^{(n-1)} \end{pmatrix}, \Delta_{11} \neq 0, \Delta_{22}^{(1)} \neq 0, \Delta_{33}^{(1)} \neq 0, \dots, \Delta_{nn}^{(n-1)} \neq 0. \tag{1.13}$$

Тогда квадратичная форма (1.12) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned}
V(t, x(t)) = & (\Delta_{11}x_1(t) + \Delta_{12}x_2(t) + \Delta_{13}x_3(t) + \dots + \Delta_{1n}x_n(t))^2 + \\
& + (\Delta_{22}^{(1)}x_2(t) + \Delta_{23}^{(1)}x_3(t) + \dots + \Delta_{2n}^{(1)}x_n(t))^2 + \dots + (\Delta_{nn}x_n(t))^2 \leq \rho^2.
\end{aligned} \tag{1.14}$$

Обозначим

$$\begin{cases} X_1(t) = \Delta_{11}x_1(t) + \Delta_{12}x_2(t) + \Delta_{13}x_3(t) + \dots + \Delta_{1n}x_n(t), \\ X_2(t) = \Delta_{22}^{(1)}x_2(t) + \Delta_{23}^{(1)}x_3(t) + \dots + \Delta_{2n}^{(1)}x_n(t), \\ \vdots \\ X_n(t) = \Delta_{nn}^{(n-1)}x_n(t). \end{cases} \tag{1.15}$$

Систему (1.15) с помощью матрицы G_n можно написать в виде

$$X(t) = G_n x(t), \tag{1.16}$$

где

$$X(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))^T, x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T.$$

Рассмотрим так называемые главные миноры матрицы (1.11) [8-10]

$$D_1 = \Delta_{11}, D_2 = \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix}, \dots, D_n = \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \dots & \Delta_{nn} \end{vmatrix}. \tag{1.17}$$

Поэтому тождество (1.14) можно записать в виде [8-10]

$$V(t, X(t)) = \frac{D_0}{D_1}(X_1(t))^2 + \frac{D_1}{D_2}(X_2(t))^2 + \dots + \frac{D_{n-1}}{D_n}(X_n(t))^2 \leq \rho^2 \quad (D_0 = 1). \tag{1.18}$$

Правая сторона выражения (1.18) является каноническим видом квадратичной формы $V(t, X(t))$.

Уравнения (1.15) являются параметрическими уравнениями для канонического вида (1.18).

Замечания.

1. Геометрически соотношения (1.15) или (1.18) в пространстве координат $X_1, X_2, \dots, X_n$ при каждом фиксированном t представляют собой n -мерный эллипсоид [1].

2. В $n + 1$ -мерном пространстве координат $X_1, X_2, \dots, X_n$ и времени t соотношения (1.15) или (1.18) представляют некоторую трубку, каждое сечение которой с гиперплоскостью $t = t^*$ представляет эллипсоид [1].

Произведя в системе (1.15) или (1.16) параллельный перенос по направлению времени на t_0 , получим систему

$$X(t - t_0) = G_n x(t - t_0). \quad (1.19)$$

Произведя то же самое относительно T_1 , получим систему

$$X(t - T_1) = G_n x(t - T_1). \quad (1.20)$$

Система уравнений (1.19) представляет собой n -мерный эллипсоид, который является пересечением трубки (1.15) с гиперплоскостью $t = t_0$, а система (1.20) - то же самое с гиперплоскостью $t = T_1$.

Вышеизложенный материал позволяет сформулировать следующую задачу.

2. Постановка задачи. Пусть класс функций (1.2) имеет непрерывную производную $\dot{x}(t)$ на отрезке $[t_0, T_1]$. Тогда выражение

$$J[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] = \int_{t_0}^{T_1} \sqrt{\dot{x}_1^2(t) + \dot{x}_2^2(t) + \dots + \dot{x}_n^2(t)} dt \quad (2.1)$$

будет функционалом, определенным на этом классе функций. Левый конец траекторий (1.2) перемещается по поверхности эллипсоида (1.19), а правый - (1.20).

Требуется определить:

1) экстремаль и минимальное значение функционала (2.1), когда левые крайние точки траекторий (1.2) перемещаются по поверхности эллипсоида (1.19), а правые - эллипсоида (1.20);

2) числа λ_i ($i = \overline{1, n}$), которые соответствуют найденной экстремали.

Решение. Обозначим подынтегральную функцию (2.1) через

$$F(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)) = \sqrt{\dot{x}_1^2(t) + \dot{x}_2^2(t) + \dots + \dot{x}_n^2(t)}. \quad (2.2)$$

Функционал (2.1) геометрически выражает длину дуги кривой $x(t)$ с концами $x(0)$ при $t = 0$ и $x(t_1)$ при $t = t_1$ [6].

Система уравнений Эйлера имеет вид [6,7].

$$\begin{aligned} \begin{cases} F_{x_k} - \frac{d}{dt} F_{\dot{x}_k} = 0, \\ F_{\dot{x}_k} = 0, k = \overline{1, n} \end{cases} &\Rightarrow \frac{d}{dt} F_{\dot{x}_k} = 0 \Rightarrow F_{\dot{x}_k \dot{x}_k} \cdot \ddot{x}_k = 0 \Rightarrow \begin{cases} \ddot{x}_k = 0 \\ F_{\dot{x}_k \dot{x}_k} \neq 0 \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ddot{x}_k = 0, k = \overline{1, n}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{cases} \ddot{x}_1(t) = 0, \\ \ddot{x}_2(t) = 0, \\ \dots \\ \ddot{x}_n(t) = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1(t) = \alpha_1, \\ \dot{x}_2(t) = \alpha_2, \\ \dots \\ \dot{x}_n(t) = \alpha_n, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1(t) = \alpha_1 t + \beta_1, \\ x_2(t) = \alpha_2 t + \beta_2, \\ \dots \\ x_n(t) = \alpha_n t + \beta_n, \end{cases} \quad (2.3)$$

где $\alpha_i, \beta_i, (i = \overline{1, n})$ – произвольные постоянные.

Обозначим

$$x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)), \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T, \beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)^T, \quad (2.4)$$

тогда система (2.3) примет следующий вид:

$$x(t) = \alpha t + \beta. \quad (2.5)$$

Уравнения (2.3) являются параметрическими уравнениями экстремалей [6,8].

Параметрическую систему уравнений (2.3) можно преобразовать к следующему каноническому виду:

$$\frac{x_1(t) - \beta_1}{\alpha_1} = \frac{x_2(t) - \beta_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{x_n(t) - \beta_n}{\alpha_n} = t. \quad (2.6)$$

С помощью (2.3) можно получить минимальное значение функционала (2.1)

$$\min J[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] = \int_{t_0}^{T_1} \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2} dt = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2} \cdot t|_{t_0}^{T_1}, \quad (2.7)$$

или

$$\min J[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] = V \cdot (T_1 - t_0), \quad (2.7_1)$$

где

$$V = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2}. \quad (2.8)$$

Выражение V из (2.8) является величиной скорости равномерного прямолинейного движения по направлению вектора $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ [8]. Тогда правая сторона выражения (2.7₁) представляет собой произведение скорости на течение времени, т.е. $V \cdot (T_1 - t_0)$ выражает длину пути материальной точки равномерного линейного движения на кратчайшем пути (экстремаль).

Следовательно, можно заключить, что минимальное значение функционала (2.1) равно длине экстремали в промежутке времени $[t_0, T_1]$.

Условия трансверсальности имеют вид [6]

$$[F + (\dot{X}_1 - \dot{x}_1)F_{\dot{x}_1} + (\dot{X}_2 - \dot{x}_2)F_{\dot{x}_2} + \dots + (\dot{X}_n - \dot{x}_n)F_{\dot{x}_n}]|_{t=t_0} = 0,$$

отсюда при (2.1)

$$\left[F + (\dot{X}_1 - \dot{x}_1)\frac{\dot{x}_1}{F} + (\dot{X}_2 - \dot{x}_2)\frac{\dot{x}_2}{F} + \dots + (\dot{X}_n - \dot{x}_n)\frac{\dot{x}_n}{F} \right]|_{t=t_0} = 0,$$

или

$$[F^2 + (\dot{X}_1 - \dot{x}_1)\dot{x}_1 + (\dot{X}_2 - \dot{x}_2)\dot{x}_2 + \dots + (\dot{X}_n - \dot{x}_n)\dot{x}_n]|_{t=t_0} = 0,$$

значит,

$$[F^2 + \dot{X}_1\dot{x}_1 + \dot{X}_2\dot{x}_2 + \dots + \dot{X}_n\dot{x}_n - (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + \dots + \dot{x}_n^2)]|_{t=t_0} = 0,$$

следовательно,

$$\left\{ (\dot{X}_1\dot{x}_1 + \dot{X}_2\dot{x}_2 + \dots + \dot{X}_n\dot{x}_n) \right|_{t=t_0} = 0, \quad (2.9)$$

$$\left\{ (\dot{X}_1\dot{x}_1 + \dot{X}_2\dot{x}_2 + \dots + \dot{X}_n\dot{x}_n) \right|_{t=T_1} = 0. \quad (2.10)$$

Подставив значения $\dot{x}_i(t) = \alpha_i, i = \overline{1, n}$ из (2.3) в (2.9) и (2.10), получим

$$\left\{ (\dot{X}_1\alpha_1 + \dot{X}_2\alpha_2 + \dots + \dot{X}_n\alpha_n) \right|_{t=t_0} = 0, \quad (2.11)$$

$$\left\{ (\dot{X}_1\alpha_1 + \dot{X}_2\alpha_2 + \dots + \dot{X}_n\alpha_n) \right|_{t=T_1} = 0. \quad (2.12)$$

Соотношения (2.11) и (2.12) выражают перпендикулярность искомой экстремали (2.5) (или (2.3)) соответственно на левой стороне поверхности эллипсоида (1.19) и на правой стороне поверхности эллипсоида (1.20).

Теперь перейдем к определению произвольных постоянных $\alpha_i, \beta_i, i = \overline{1, n}$ из (2.3).

Воспользуемся тем фактом, что левый конец экстремали (2.3) перемещается по поверхности эллипсоида (1.19), а правый – по (1.20).

Согласно приведенным выше замечаниям, следует, что координаты всех точек эллипсоида (1.19) имеют одинаковые значения $t = t_0$, а для эллипсоида (1.20) - $t = T_1$.

Нетрудно заметить, что левый конец экстремали (2.5) имеет вид

$$x(t_0) = \alpha t_0 + \beta, \quad (2.13)$$

а правый конец:

$$x(T_1) = \alpha T_1 + \beta. \quad (2.14)$$

Таким образом, имеем следующие уравнения:

$$\begin{cases} \alpha t_0 + \beta = (t_0, t_0, \dots, t_0)^T = t_0 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T, \\ \alpha T_1 + \beta = (T_1, T_1, \dots, T_1)^T = T_1 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T. \end{cases} \quad (2.15)$$

$$(2.16)$$

Вычитая (2.15) из уравнения (2.16), получим

$$\alpha(T_1 - t_0) = (T_1 - t_0)(1, 1, \dots, 1)^T,$$

т.е.

$$\alpha = (1, 1, \dots, 1)^T, (t_0 \neq T_1). \quad (2.17)$$

Из (2.15) и (2.17) следует

$$t_0 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T + \beta = t_0 (1, 1, \dots, 1)^T,$$

значит,

$$\beta = t_0(1, 1, \dots, 1)^T - t_0 (1, 1, \dots, 1)^T,$$

следовательно,

$$\beta = (0, 0, \dots, 0)^T. \quad (2.18)$$

Из (2.17) и (2.18) следует окончательный вид для экстремали (2.6):

$$x_1(t) = x_2(t) = \dots = x_n(t) = t. \quad (2.19)$$

Следовательно, искомая экстремаль проходит через начало координат $(0, 0, \dots, 0)$ и имеет направляющий вектор

$$\tilde{\alpha} = \{1, 1, \dots, 1\}. \quad (2.20)$$

С помощью (2.17) полученное минимальное значение (2.7) для функционала (2.1) приобретает вид

$$\min J[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] = \int_{t_0}^{T_1} \sqrt{1 + 1 + \dots + 1} dt = \sqrt{n} \cdot t \Big|_{t_0}^{T_1},$$

или

$$\min J[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] = \sqrt{n} \cdot (T_1 - t_0) = V \cdot (T_1 - t_0), \quad (2.21)$$

где

$$V = \sqrt{n} \quad (2.22)$$

является величиной скорости равномерного прямолинейного движения по направлению вектора $\tilde{a} = \{1, 1, \dots, 1\}$.

Остался один из следующих основных вопросов: как определить значения λ_i ($i = \overline{1, n}$), которые соответствуют полученной выше экстремали (2.3)? Поступим следующим образом: пусть произвольные постоянные $C_i, i = \overline{1, n}$ из (1.6) уже известны при начальных условиях, когда $t = t_0$. Экстремаль (2.3) должна совпасть с одной из любых траекторий (1.6) при соответствующем выборе $\lambda_i, i = \overline{1, n}$. Сравнивая системы (1.6) и (2.3) при (2.14), (2.17), (2.18) и $t = T_1$, получим следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 m_{11} e^{\lambda_1 T_1} + C_2 m_{12} e^{\lambda_2 T_1} + \dots + C_n m_{1n} e^{\lambda_n T_1} = T_1, \\ C_1 m_{21} e^{\lambda_1 T_1} + C_2 m_{22} e^{\lambda_2 T_1} + \dots + C_n m_{2n} e^{\lambda_n T_1} = T_1, \\ \dots \\ C_1 m_{n1} e^{\lambda_1 T_1} + C_2 m_{n2} e^{\lambda_2 T_1} + \dots + C_n m_{nn} e^{\lambda_n T_1} = T_1. \end{cases} \quad (2.23)$$

Предполагая, $C_i \neq 0$ ($i = \overline{1, n}$) и возвращаясь к работе [3], можно доказать, что матрица $N = (C_i m_{ji})$ ($i, j = \overline{1, n}$) невырожденная. Следовательно,

$$(e^{\lambda_1 T_1}, e^{\lambda_2 T_1}, \dots, e^{\lambda_n T_1})^T = N^{-1} \cdot (T_1, T_1, \dots, T_1)^T. \quad (2.24)$$

Матрицу N^{-1} представляем с помощью строк следующим образом:

$$N^{-1} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{pmatrix}.$$

Тогда выражение (2.24) можно преобразовать к виду

$$(e^{\lambda_1 T_1}, e^{\lambda_2 T_1}, \dots, e^{\lambda_n T_1})^T = (N_1, N_2, \dots, N_n)^T \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1,$$

откуда следует

$$\begin{cases} e^{\lambda_1 T_1} = N_1 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1, \\ e^{\lambda_2 T_1} = N_2 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1, \\ \vdots \\ e^{\lambda_n T_1} = N_n \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1. \end{cases} \quad (2.25)$$

Так как левые стороны в (2.25) - положительные числа, то значит, и правые стороны - также положительные числа.

Прологарифмировав обе стороны системы (2.25) и разделив на $T_1 \neq 0$, окончательно находим

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{T_1} \ln[N_1 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1], \\ \lambda_2 = \frac{1}{T_1} \ln[N_2 \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1], \\ \vdots \\ \lambda_n = \frac{1}{T_1} \ln[N_n \cdot (1, 1, \dots, 1)^T \cdot T_1]. \end{cases} \quad (2.26)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абгарян К.А.** Матричные и асимптотические методы в теории линейных систем. – М.: Наука, 1973. - 431 с.
2. **Абгарян К.А.** К теории устойчивости процессов на заданном промежутке времени //ПММ.– М., 1975. – Т. 39, вып. 5. – С.827-834.
3. **Григорян Ф.П.** Синтез управлений с желаемым спектром в системе автоматического регулирования //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2002. –Т. 55, N1. –С. 121-127.
4. **Бермант А.Ф., Араманович И.Г.** Краткий курс математического анализа. Для ВТУЗ-ов. – М.: Наука, 1969. - 735 с.
5. **Дорф Р., Бишоп Р.** Современные системы управления. –М.: Лаборатория базовых знаний “Юнимедиастиль”, 2002. -831 с.
6. **Краснов М.Л., Макаренко Г.И., Киселев А.Н.** Вариационное исчисление. –М.: Наука, 1973. - 190 с.
7. **Колмогоров А.Н., Фомин С.В.** Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1976. - 542 с.
8. **Ефимов Н.В.** Краткий курс аналитической геометрии. – М.: Наука, 1969. - 272 с.
9. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. – М.: Наука, 1967. - 376 с.
10. **Александров П.С.** Лекции по аналитической геометрии. – М.: Наука, 1968. - 912 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.04. 2018.

Ֆ.Պ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻՆԹԵԶԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ. II

Գծային ինտեգրալիֆերենցիալ հավասարումների ստացիոնար համակարգում դիտարկված է օպտիմալ կառավարման սինթեզի մի խնդիր, որն ապահովում է ինքնաթիռի կամ տիեզերանավի վառելանյութի ծախսի նվազարկումը: Այն լուծվել է վարիացիոն հաշվի տեղաշարժվող եզրերով մի խնդրի միջոցով, երբ շարժվող նյութական կետի հետագծերի ծայրերը շարժվում են տրված երկու էլիպսոիդների մակերևույթների վրայով:

Առանցքային բառեր. օպտիմալ կառավարման սինթեզ, ինտեգրալիֆերենցիալ հավասարումների ստացիոնար համակարգ:

F.P. GRIGORYAN

THE SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL. II

In a linear integro-differential stationary system of equations, one problem of optimal control synthesis is considered which ensures the minimization of fuel consumption of an airplane or a space jar. It is solved with the help of one problem of the calculus of variations with moving boundaries when the ends of the trajectory of a moving material point move along the two given surfaces of the ellipsoids.

Keywords: synthesis, optimal control, integro-differential stationary system of equations.

В.П. БАЛДЖЯН

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ УСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ
РУСЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Исследованы русловые преобразования, происходящие на различных участках водостоков из-за размыва русла или отложения наносов. Со временем этот процесс затухает, и русло приобретает новую стабильную форму. Разработана общая математическая модель для стабилизированной стадии русловых преобразований. С этой целью предложена такая постановка задачи, которая позволяет рассматривать новую форму русла не как конечный результат сложного нестационарного процесса, а как отдельно решаемую задачу стационарного движения. С использованием основных балансовых уравнений гидродинамики двухфазного потока получено простое дифференциальное уравнение. Его решение дает возможность прогнозировать координаты дна нового русла, образованного в результате стабилизации русловых изменений.

Ключевые слова: водосток, русловое преобразование, стабилизированное русло, живое сечение, ширина русла.

Введение. Любое природное нестационарное явление берет начало с устойчивого состояния и со временем возвращается к прежней стационарности или приобретает новую устойчивую форму. Аналогичный процесс наблюдается и в ходе русловых преобразований. Если по какой-то причине на определенном участке водостока начинаются русловые изменения (размыв или отложение наносов), то со временем этот процесс затухнет, и русло обязательно приобретет новую стабильную форму. При этом восстанавливается условие постоянства расхода наносов по длине русла, имеющего место до начала преобразований. Существенные значения русловых преобразований наблюдаются при прохождении паводков и селевых потоков. На горных и предгорных участках рек, где руслообразующие породы нескальные и достаточно легко деформируются, этот процесс сравнительно скоротечен. Для таких водосток более характерно вертикальное направление руслового преобразования, т.е. изменяется положение дна русла: в верхних течениях происходит размыв и транспортировка грунта, а в нижних - их отложение. На равнинных участках сравнительно увеличивается удельный вес изменения планового очертания реки. Аналогичные процессы происходят и в случае установления на реках гидротехнических сооружений. В частности, перед поперечными русловыми сооружениями (плотина, селеуловитель и т.п.) из-за отложения

наносов дно поднимается. У мостовых переходов, берегозащитных и прочих сооружений может наблюдаться как размыв дна, так и отложение наносов. Необходимо отметить, что в научной литературе задачи русловых преобразований не рассматривались как частные решения общей модели. Достаточно надежно решены задачи по расчету деформации мостовых переходов через равнинные большие реки [1]. Хорошо изучена проблема прогнозирования плановых и вертикальных изменений русел тех же рек [2,3]. Известно, что значительные русловые изменения происходят в верхних течениях многочисленных водостоков. При освоении горно-предгорных территорий устанавливается большое количество русловых сооружений сравнительно малых размеров. Это приводит к изменению естественного режима реки и развитию русловых изменений. Несмотря на актуальность данной проблемы, она изучена достаточно слабо. Предложены нестрогие частные решения, однако обобщенная достоверная постановка проблемы отсутствует.

Надежность расчетных размеров сооружения (высота плотины и селеуловителя, определение глубины заложения фундаментов мостовых и берегозащитных конструкций и т.д.) обусловлена точностью прогнозирования координат поверхности, установившейся в ходе стабилизации процесса, т.е. после завершения русловых изменений. Следовательно, достоверность прогноза положения дна русла имеет важное практическое значение.

Целью работы является разработка математической модели русловых преобразований на стадии приобретения устойчивой формы.

Постановка задачи. Предположим, что на каком-то участке реки с координатами первоначального дна Z_c (рис. 1) происходят русловые изменения, в частности, из-за отложения наносов дно поднимается. Через определенное время этот процесс на данном участке будет завершен, и по длине реки снова восстановится транзитная транспортировка поступающих наносов, т.е. расход наносов станет постоянным. После завершения руслового преобразования на этом участке новое устойчивое дно S-S характеризуется координатами Z и толщиной слоя отложений наносов H . В указанных условиях движение потока в русле станет стационарным, характеризующимся гидравлическими параметрами b, A, V, i (рис.1), где уклон поверхности S-S определяется как $i = \frac{dz}{dx}$ (положительное направление x принято против течения). В

соответствии с продольным сечением стабилизированного участка русла, указанным на рис. 1, плановое очертание будет иметь расширяющийся по движению вид (непризматическое русло, рис. 2).

Предложенная постановка позволяет рассматривать задачу по установлению формы стабилизированной поверхности не как конечный результат сложного нестационарного процесса, а как отдельно решаемую задачу стационарного движения. При этом искомыми величинами являются координаты поверхности S-S и параметры стационарного наносонесущего потока, движущегося по ней.

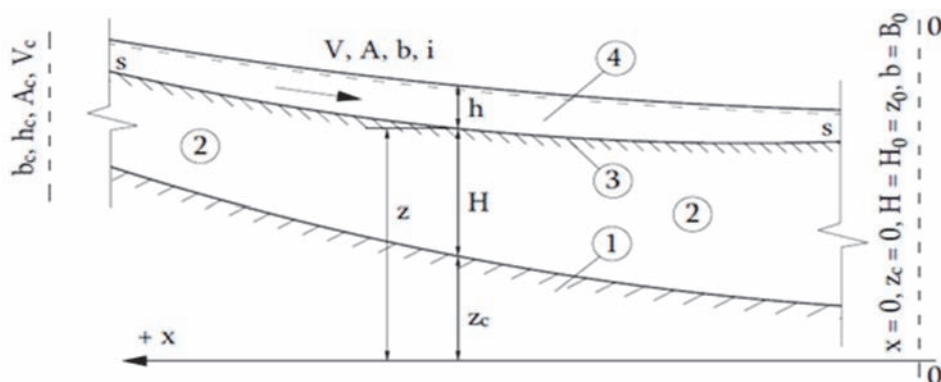


Рис. 1. Расчетная схема продольного сечения участка водостока на завершающей стадии руслообразующих процессов и граничные условия: 1– дно водотока до русловых изменений, 2– наносные отложения, 3- дно водотока после русловых изменений (стабилизированная поверхность S-S), 4 – зона движения стационарного одномерного потока

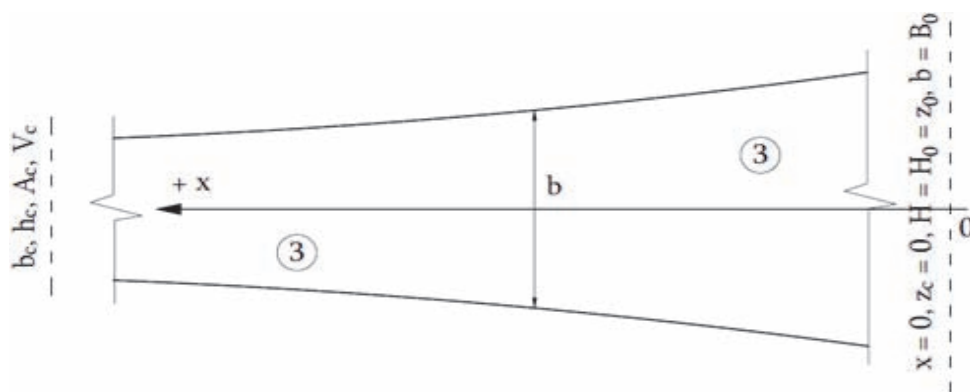


Рис. 2. Плановое очертание участка водостока на завершающей стадии руслообразующих процессов и граничные условия: 3 - дно русла после русловых изменений (стабилизированная поверхность S-S)

Результаты исследования. Постановкой задачи доказано, что движение наносонесущего потока в новом русле имеет стационарный характер. Для такого случая применимы законы гидродинамики одномерного установив-

шегося движения, в которых имеют место три балансовых уравнения: уравнение движения или энергии, постоянство расходов потока и наносов [4,5]:

$$-\left[\frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right)\right] = \frac{dh_f}{dx}, \quad (1)$$

$$Q = V A = \text{const}, \quad (2)$$

$$Q_s = \text{const} \quad \text{или} \quad S = \text{const}, \quad (3)$$

где Q_s - расход наносов; S – объем наносов в единице объема потока (концентрация потока). Допустимость применения уравнения (1) для наносонесущих потоков до концентрации 0,5 (объемы наносов и воды равны) доказана в работе [6].

С учетом приведенной системы уравнений в работах [7,8] решены частные задачи русловых преобразований по установлению уклона конечной поверхности селевых отложений. При этом в условии постоянства расхода наносов (3) использованы конкретные формулы. Но, как показывают многие авторы [9,10], при одинаковых исходных данных для величины Q_s (или S) разные формулы дают отличающиеся друг от друга в несколько раз результаты. Учитывая указанные и ряд других недостатков существующих методов, в данной работе сделана попытка разработать основы обобщенной теории для описания исследуемого процесса, а для прямоугольной формы русла предложить решение задачи.

По движению потока продольный уклон русла обычно уменьшается. В верхних течениях наносонесущая способность потока выше, и из-за его низкой загруженности наносами наблюдается транзитное движение. С уменьшением уклона русла уменьшается и наносонесущая способность. На определенном участке реки загруженность потока приобретает предельное значение. После этого участка поток не в состоянии нести все количество наносов, и начинается их отложение. Обозначая индексом “0” все параметры на участке предельной загруженности потока и используя уравнение неразрывности потока (2), введем безразмерные величины (линейным масштабом безразмерности принята ширина указанного участка b_0)

$$\bar{h} = \frac{h}{b_0}, \quad \bar{b} = \frac{b}{b_0}, \quad \bar{A} = \frac{A}{A_0}, \quad \bar{\chi} = \frac{\chi}{\chi_0}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} = 1, \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0}. \quad (4)$$

Согласно уравнению (2) $\bar{Q} = 1$, будем иметь

$$\bar{V} = \frac{1}{A}. \quad (5)$$

На основе анализа и обработки более сорока формул по определению расхода наносов в условиях соблюдения баланса наносов в работе [11] получена закономерность между смоченным периметром и площадью живого сечения

$$\bar{\chi} = \bar{A}^a, \quad (6)$$

где показатель степени a с учетом многообразия анализируемых формул, соответствующих разным русловым режимам, меняется в интервале от 3,0 до 4,5.

Представляя уравнение (1) в безразмерном виде, используя ряд известных в гидродинамике закономерностей и совместно решая его с зависимостями (5) и (6), ранее нами было получено следующее дифференциальное уравнение [12]:

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} + \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 \bar{A}^3} \frac{d\bar{A}}{d\bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{A}^{(4a-10)/3}, \quad (7)$$

где Fr_0 - число Фруда; i_0 - уклон русла и $\beta_0 = \frac{b_0}{h_0}$ соответствуют участку русла с шириной b_0 .

Это уравнение применимо для разных режимов движения наносонесущего потока небольшой глубины, когда русловые преобразования на данном участке реки практически завершены, и русло приобретает новое устойчивое состояние. В уравнении (7) имеется три неизвестных: координата стабилизированной поверхности Z , глубина потока h и площадь его поперечного сечения A . Поскольку в непризматических руслах величина A меняется и по глубине, и по длине русла, т.е. $A = f(h, x)$, то производное площади представляется как

$$\frac{dA}{dx} = \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial h} \frac{dh}{dx}. \quad (8)$$

С учетом безразмерных параметров будем иметь

$$\frac{d \bar{A}}{d \bar{x}} = \frac{\partial \bar{A}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial \bar{h}} \frac{d \bar{h}}{d \bar{x}}. \quad (9)$$

Подставляя безразмерное значение производной площади в уравнение (7), получим

$$\frac{d \bar{z}}{d \bar{x}} + \frac{d \bar{h}}{d \bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 \bar{A}^3} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial \bar{h}} \frac{d \bar{h}}{d \bar{x}} \right) = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{A}^{(4a-10)/3}. \quad (10)$$

Полученное уравнение показывает, что задачу невозможно решить без конкретизации поперечной формы русла. Все многообразие поперечных сечений водостоков обычно представляется в виде прямоугольной, параболоидной или трапецеидальной форм. Частное производное $\partial \bar{A} / \partial \bar{h}$ представляет собой некую ширину живого сечения и зависит от поперечной формы русла. В общем случае оно меняется по глубине. Если же русло прямоугольное, эта ширина для данного сечения будет постоянной. Что касается производной $\partial \bar{A} / \partial \bar{x}$, то она может определяться лишь при известной плановой конфигурации участка русла, подвергнутого русловым преобразованиям. Кроме поперечной формы, для решения задачи по уравнению (10) должна быть известна и закономерность изменения боковых стенок сформированного непризматического русла. С учетом сказанного последующие решения задачи могут быть упрощены, если в дифференциальном уравнении (7) параметры живого сечения A и h заменить на ширину русла b . При этом поперечное сечение русла, как более практичное, принимается трапецеидальным (рис. 3 а).

После завершения процесса отложения наносов в этом русле образовалось новое устойчивое дно $S-S$ (положение 3 на рис. 3 а). В дальнейшем стационарное движение наносонесущего потока происходит по этой поверхности. Зона движения естественно трапецеидальная (положение 4 на рис. 3 а). Для упрощения дальнейших разработок делается практически незначительное допущение – зона движения принимается прямоугольной (положение 5 на рис. 3 б). Это означает, что в поперечном сечении пренебрегаются затемненные треугольники (рис. 3 б). На водостоках соотношение b/h обычно меняется в промежутке 3-15. С учетом этого, по сравнению с общей площадью живого сечения A , без существенных ошибок суммой площадей этих треугольников можно пренебречь.

Для прямоугольной поперечной формы русла площадь и смоченный периметр живого сечения определяются следующими безразмерными зависимостями:

$$\bar{A} = \beta_0 \cdot \bar{b} \cdot \bar{h}, \quad (11)$$

$$\bar{\chi} = \frac{\beta_0}{\beta_0 + 2} (\bar{b} + 2\bar{h}), \quad (12)$$

где β_0 - известное в гидравлике соотношение b_0 / h_0 .

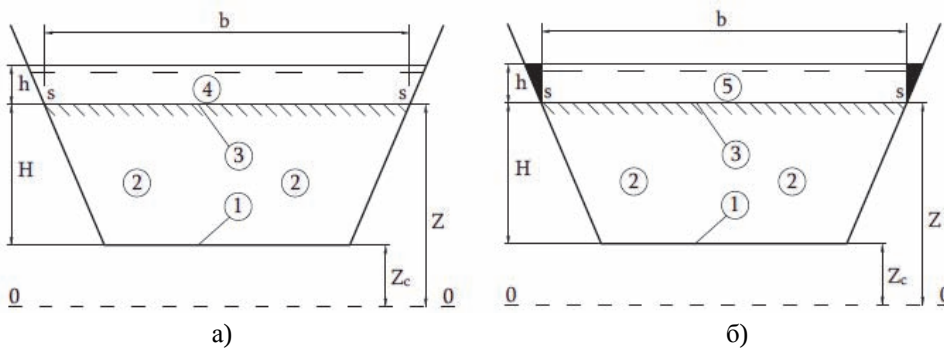


Рис. 3. Схема поперечного сечения участка русла, подвергнутого преобразованиям: а- фактическая; б- расчетная; 1- дно водотока до русловых изменений, 2- отложение наносов, 3- дно водотока после русловых изменений (стабилизированная поверхность s-s), 4 – фактическая зона движения (трапецидальная), 5 – расчетная зона движения (прямоугольная)

Совместно решая выражения (6), (11) и (12) и проведя ряд упрощений, получим

$$\bar{h} = \frac{1}{\beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{a-1/a}}. \quad (13)$$

С учетом зависимости (13) закономерность (11) примет следующий вид:

$$\bar{A} = \bar{b}^{1/a}, \quad (14)$$

а вместо выражения (5) получим

$$\bar{V} = \frac{1}{\bar{b}^{1/a}}. \quad (15)$$

Согласно выражениям (13) и (14), имеем

$$\frac{d \bar{h}}{d \bar{x}} = -\frac{a-1}{a \beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} \frac{d \bar{b}}{d \bar{x}}, \quad (16)$$

$$\frac{d \bar{A}}{d \bar{x}} = \frac{1}{a \bar{b}^{(a-1)/a}} \frac{d \bar{b}}{d \bar{x}}. \quad (17)$$

Учитывая выражения (14), (16) и (17), дифференциальное уравнение (7) примет вид

$$\frac{d \bar{z}}{d \bar{x}} - \frac{a-1}{a \beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} \frac{d \bar{b}}{d \bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 a} \frac{1}{\bar{b}^{(a+2)/a}} \frac{d \bar{b}}{d \bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{b}^{-(4a-10)/3a}, \quad (18)$$

или в окончательном виде будем иметь

$$\frac{d \bar{z}}{d \bar{x}} - \frac{1}{a \beta_0} \left(\frac{a-1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} + \frac{Fr_0}{\bar{b}^{(a+2)/a}} \right) \frac{d \bar{b}}{d \bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{b}^{-(4a-10)/3a}. \quad (19)$$

С помощью уравнения (19) установлена связь между координатой дна русла и его шириной на том участке водостока, где в результате русловых изменений образовано новое стабилизированное русло и восстановлена стационарность движения. Это уравнение получено совместным решением трех балансовых уравнений гидродинамики применительно к условиям движения потока небольшой глубины. Для интегрирования уравнения (19) необходимы краевые и начальные условия данной задачи, т.е. нужно иметь закономерность изменения ширины русла (например, конфигурация мостового перехода обычно задается) или зависимость между Z и b (например, на рис. 3 такая связь наблюдается).

Заключение. Решение уравнения (19) дает возможность прогнозировать конечный результат естественных и искусственных русловых преобразований как в случае отложения наносов, так и при смыве дна водостока. В частности, можно рассчитать деформации мостового перехода, установить координаты верхней поверхности селевых отложений, образованных на конусах выносов или в верхнем бьефе поперечных задерживающих сооружений, и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федотов Г.А.** Проектирование автомобильных дорог. - М.: Транспорт, 1989. – 437с.
2. **Гришанин К.В.** Динамика русловых потоков. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 311с.
3. **Клавен А.Б., Копалиани З.Д.** Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и русловых процессов. - СПб.: Нестор-История, 2011.- 504с.
4. **Чоу В.Т.** Гидравлика открытых каналов /Пер. с англ.; Под ред. А.И. Богомолова. -М.: Госстройиздат, 1969. – 464 с.
5. **Саноян В.Г.** Теория транспортирующей способности потока и ее приложения к разработке новых конструкций гидротехнических сооружений и проблемам руслоформирования: Автореферат дис. ... д.т.н. /ВНИИИВОДГЕО. - М., 1990. – 48с.
6. **Балджян П.О., Балджян В.П.** Руслоформирующие явления у селезащитных сооружений. Методы расчета их параметров. - Germany-Latvia, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.- 57 p.
7. **Тевзадзе В.И.** Методика расчета параметров селевых потоков и конструкций противоселевых сооружений, применяемых в Японии /ЦБНТИ Минводхоза СССР.- Обзорная информация, N12.-М., 1977. – 48 с.
8. **Балджян П.О.** О методике расчета руслоформирующего процесса в верхнем бьефе селевых и паводковых задерживающих сооружений //Материалы V Всероссийской н/т конференции “Политранспортные системы”. Часть 1.- Красноярск, 2007.- С. 334-340.
9. **Юфин А.П.** Движение наносов и гидравлический транспорт.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 199 с.
10. **Флейшман С.М., Перов В.Ф.** Сели. – М.: Изд. МГУ, 1986. – 286 с.
11. **Балджян П.О.** Определение зависимости между гидравлическими параметрами потоков при постоянстве их наносонесущей способности //Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН.- 2005.-Т. 58, N 2. - С. 380 - 385.
12. **Балджян В.П., Токмаджян В.О., Балджян П.О., Баюнц А.В.** Прогноз положения поверхности отложений на верхнем бьефе селезащитных сооружений. //Материалы V Межд. конференции “Селевые потоки: катастрофы, прогноз, защита”, 1-5 октября 2018 г. - Тбилиси-Телави, 2018.- С. 283-288.

Шушинский технологический университет. Материал поступил в редакцию 12.02.2019.

Վ.Պ. ԲԱԼՋՅԱՆ

ՀՈՒՆԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱԳՄԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՅՈՒՆԱՑԱԾ ՓՈԻԼԻ ՏԵՍԱԿԱՆ
ՀԻՍՔԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել են հունային վերակազմավորումները, որոնք հունների ողողման կամ ջրաբերունկների կուտակման պատճառով ընթանում են ջրահոսքերի տարբեր տեղամասերում: Ժամանակի ընթացքում այդ գործընթացը մարում է, և հունը ձեռք է բերում կայունացած նոր տեսք: Հունային վերակազմավորումների կայունացած փուլի համար մշակվել է ընդհանուր մաթեմատիկական մոդել: Այդ նպատակով առաջարկվել է խնդրի այնպիսի դրվածք, որը թույլ է տալիս հունի նոր տեսքը ոչ կայունացած բարդ երևույթի վերջնարդյունքի փոխարեն դիտարկել որպես կայունացած շարժման անկախ խնդրի լուծում: Երկֆազ հեղուկի հիդրոդինամիկայի հիմնական հաշվեկշռային հավասարումների օգտագործմամբ ստացվել է պարզ դիֆերենցիալ հավասարում: Դրա լուծումը հնարավորություն է տալիս կանխատեսել հունային փոփոխությունների կայունացման արդյունքում ձևավորված նոր հունի կոորդինատները:

Առանցքային բառեր. ջրահոսք, հունային վերակազմավորում, կայունացած հուն, կենդանի կտրվածք, հունի լայնություն:

V.P. BALJYAN

DEVELOPING THE THEORETICAL BASES OF THE ESTABLISHED STAGE
OF THE RIVER BED CONVERSION

The river bed conversions that occur in different parts of the drainage due to the erosion of the river bed or sediment deposition are investigated. Over time, this process fades, and the river bed acquires a new stable form. A general mathematical model has been developed for the stabilized stage of the river bed conversion. At that, such a formulation of the problem is proposed which allows to consider a new form of the river bed not as the end result of a complex non-stationary process, but as a separately solvable problem of the stationary motion. Using the basic balance equations of hydrodynamics of a two-phase flow, a simple differential equation is obtained. Its solution makes it possible to predict the coordinates of the bottom of the new river bed formed as a result of the stabilization of the river bed changes.

Keywords: drain, river bed conversion, stabilized river bed, living cut, width of the river bed.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ Մ.Ա., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Գ., ԲԱԲԱՅԱՆ Ա.Ա. ԲԱՐԱԿԱՊՍ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԽՈՂՈՎԱԿԻ ԿՈՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՍՍՅՐՈՒՄ ԿՈՐԶԱՆՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ.....	5
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ՇՈՒԽՅԱՆ Է.Ս. ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴԱՐՁԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՅԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՐԿՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ	15
ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Գ.Ա., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Լ.Ս., ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Ա.Գ. ՊԱՅԹԵՅՎԱԾ ԼԵՌՆԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ՄԱՆՐԱՅՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՒՄԸ ՇԻՆԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՈՉ ՀԱՆՔԱՔԱՐԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	26
ԲԱԴԱԼՅԱՆ Ն.Պ., ԲԱՂՂԱՍԱՐՅԱՆ Մ.Ք., ԿՈԼԵՍՆԻԿ Գ.Պ. ՈՒԺԱՅԻՆ ՄԱԼՈՒԽԻ ԷԿՐԱՆԱՅԻՆ ՈՇԺԻՄԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ.....	37
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Խ., ՉՈՒԽԱԶՅԱՆ Ն.Հ. «ՄԱԳԼԵՎ» ԳՆԱՅՔԻ ԿԱԽՈՑԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ՓՈԽԱՐԻՆՄԱՆ ՄԽԵՄԱՆ ԵՎ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ	47
ԳՆՈՒՆԻ Տ.Ս., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Մ.Լ. ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ԵՎ ՆԵՐԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՅՈՒԹՅԱՆ ՄԿԶԲՈՒՆՔԸ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐՈՒՄ	57
ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Մ. ԶՈՒԼԱԾՈ ՄԵԿՈՒՍՉՈՎ ՀՈՍԱՆՔԱՍԱՐԲԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ ՕԴԱՅԻՆ ՄԵԿՈՒՍՉՈՎ ՀՈՍԱՆՔԱՍԱՐԲԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏ	69
ԱՅՎԱԶՅԱՆ Գ.Ե., ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ Ս.Խ., ԼԵԲԵՂԵՎ Մ.Ս., ՄԵՍՉԵՆԿՈ Ա.Վ. N-ՏԻՊԻ ՄԵՎ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ՊԱՍՄԻՎԱՅՈՒՄԸ	78
ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ս.Գ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ., ԵԶԱԿՅԱՆ Ն.Դ., ՄԿՐՏՉՅԱՆ Ն.Ս. ՀԱՄԱԿՅՎԱԾ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԱԽՏՈՐՈՇԻՉ ԲԺՇԿԱԿԱՆ ՄԱՐՔ	85
ԵՍԱՅԱՆ Ա.Է. ԵՐԿՓԱԿԱՆԻ, ԿԱՐՃ ՈՒՂԵՏԱՐՈՎ ՖԻՆՖԵՏ ՏՐԱՆՁԻՍՏՈՐԻ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՄՈԴԵԼԸ ՇԱՐԺՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԴԵԳՐԱԴԱՅԻԱՅԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ	93
Ա.Ա. ԴԱՎԹՅԱՆ ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԻ I/V ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ ԶՐԱԾՆԻ ՊԵՐՕՔՍԻԴԻ ԳՈԼՈՐՇՈՒ ՄԻԶԱՎԱՅՐՈՒՄ	102
ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Տ.Ո., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ԲԱԲԱՅԱՆ Ա.Ն. ՈՒԺԱԳԾԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՅՎԱԾ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄ՝ ԵՌԱՆԿՅՈՒՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑՈՎ ԵՐԿՉԱՓ ՖՈՒՆԿՅՈՒՅԻ ԿՏՈՐ-ԳԾԱՅԻՆ ՄՈՏԱՐԿՄԱՄԲ	113
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ֆ.Պ. ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻՆԹԵԶԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ II	120
ԲԱԼԶՅԱՆ Վ.Պ. ՀՈՒՆԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՅՈՒՆԱՅԱԾ ՓՈՒԼԻ ՏԵՍԱԿԱՆ ՀԻՄՔԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	131

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОСЯН Г.Л., МАРГАРЯН М.А., ВАРДАНИЯН Г. Г., БАБАЯН А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ СПЕЧЕННОЙ ТРУБЫ ЧЕРЕЗ КОНИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ	5
АГБАЛАН С.Г., ПЕТРОСЯН А.А., ШУХЯН Е.С. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ НА СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	15
АГАРОНЯН Г.А., АКОПЯН Л.С., АГАРОНЯН А.Г. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДРОБЛЕНИЯ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕРУДНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	26
БАДАЛЯН Н.П., БАГДАСАРЯН М.К., КОЛЕСНИК Г.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЭКРАНА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ	37
ГРИГОРЯН А.Х., ЧУХАДЖЯН Н.Г. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕСА ПОЕЗДА “МАГЛЕВ”	47
ГНУНИ Т.С., ХАЧАТРЯН М.Л. ПРИНЦИП ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И ВЛОЖЕНИЙ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ	57
АРУТЮНЯН А.М. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОПРОВОДОВ С ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПО СРАВНЕНИЮ С ТОКОПРОВОДАМИ С ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ	69
АЙВАЗЯН Г.Е., ХУДАВЕРДЯН С.Х., ЛЕБЕДЕВ М.С., СЕМЧЕНКО А.В. ЭФФЕКТИВНАЯ ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ N-ТИПА	78
МАРТИРОСЯН С.Г., ГУЛЯН А.Г., ЕЗАКЯН Н.Д., МКРТЧЯН Н.С. ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МЕДИЦИНСКОЕ УСТРОЙСТВО С КОМБИНИРОВАННЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ	85
ЕСАЯН А.Э. МОДЕЛЬ ЕМКОСТИ КОРОТКОКАНАЛЬНОГО ФИНФЕТА С ДВОЙНЫМ ЗАТВОРОМ, ВКЛЮЧАЯ ЭФФЕКТ ДЕГРАДАЦИИ ПОДВИЖНОСТИ	93
ДАВТЯН А.А. I/V ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАНОПЛЕНКИ В СРЕДЕ ПАРОВ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА	102
МЕЛКОНЯН Т.Р., СУКИАСЯН Г.С., БАБАЯН А.Н. О ПОСТРОЕНИИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ С ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКОЙ	113
ГРИГОРЯН Ф.П. К СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ. II	120
БАЛДЖЯН В.П. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ УСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ РУСЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	131

CONTENTS

PETROSYAN G.L., MARGARYAN M.A., VARDANYAN G.G., BABAYAN A.A. INVESTIGATING THE PROCESS OF DRAWING OF A THIN-WALLED SINTERED PIPE THROUGH A CONICAL MATRIX	5
AGHBALYAN S.G., PETROSYAN A.A., SHUKHYAN E.S. THE INFLUENCE OF THE FACTOR OF THERMAL EXPANSION ON THE PROPERTIES OF BIMETALLIC POWDER COMPOSITE MATERIALS.....	15
AHARONYAN G.A., HAKOBYAN L.S., AHARONYAN A.G. REGULATING THE DEGREE OF CRUSHING OF THE EXPLODED ROCK MASS WHEN DEVELOPING THE DEPOSITS OF NON-METAL CONSTRUCTION MATERIALS.....	26
BADALYAN N.P., BAGHDASARYAN M.K., KOLESNIK G.P. MODELING THE POWER CABLE SCREEN MODE	37
GRIGORYAN A.Kh., CHUKHAJYAN N.H. THE EQUIVALENT SCHEME OF A MAGNETIC CIRCUIT AND A MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTROMAGNETIC SYSTEM OF THE MAGLEV TRAIN SUSPENSION	47
GNUNI T.S., KHACHATRYAN M.L. THE PRINCIPLE OF OPTIMAL CORRELATION OF ENERGY LOSSES AND CAPITAL INVESTMENTS IN TRANSMISSION LINES	57
HARUTYUNYAN A.M. ECONOMIC JUSTIFICATION OF USING A CAST RESIN BUSBAR SYSTEM AS COMPARED TO AN AIR INSULATED BUS DUCT SYSTEM	69
AYVAZYAN G.Y., KHUDAVERDYAN S.K., LEBEDEV M.S., SEMCHENKO A.V. EFFICIENT SURFACE PASSIVATION OF N-TYPE BLACK SILICON	78
MARTIROSYAN S.G., GHULYAN A.G., EZAKYAN N.D., MKRTCHYAN N.S. MEDICAL DIAGNOSTIC DEVICE WITH COMBINED PHYSICAL EFFECTS.....	85
YESAYAN A.E. CAPACITANCE MODEL OF SHORT CHANNEL DOUBLE-GATE FINFET INCLUDING MOBILITY DEGRADATION EFFECT	93
DAVTYAN A.A. I/V CHARACTERISTICS OF A FERROELECTRIC NANOFILM TOWARDS THE HYDROGEN PEROXIDE STEAM.....	102
MELKONYAN T.R., SUKIASYAN H.S., BABAYAN A.N. CONSTRUCTING POWER LINES OF A PIECEWISE LINEAR APPROXIMATION OF A TWO-DIMENSIONAL FUNCTION WITH A TRIANGULAR GRID	113
GRIGORYAN F.P. THE SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL. II	120
BALJYAN V.P. DEVELOPING THE THEORETICAL BASES OF THE ESTABLISHED STAGE OF THE RIVER BED CONVERSION	131