

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

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 71

N 1

ՀՈՒՆՎԱՐ – ՄԱՐՏ

ԵՐԵՎԱՆ 2018

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 71

N 1

ЯНВАРЬ – МАРТ

ЕРЕВАН 2018

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 71

N 1

JENUARY - MARCH

YEREVAN 2018

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Վ.Շ. ՄԵԼԻԿՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ),
Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ,
Լ.Հ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ, Հ.Վ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Մ.Ք. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ,
Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Հ.Ս. ԿԱՐԱՅԱՆ, Ա.Ա. ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ, Վ.Ն. ՀԱԿՈԲՅԱՆ,
Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈՒՉՈՒԿՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.Ш. МЕЛИКЯН (главный редактор), А.Х. ГРИГОРЯН (зам. глав. редактора),
Ж.С. СЕЙРАНЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН, В.Н. АКОПЯН,
Л.А. АСЛАНЫАН, А.А. АХУМЯН, М.К. БАГДАСАРЯН, О.В. БАГДАСАРЯН,
А.Г. ГУЛЯН, С.П. ДАВТЯН, Г.С. КАРАЯН, А.Т. КУЧУКЯН, В.З. МАРУХЯН,
О.О. ПЕТРОСЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, С.О. СИМОНЯН

EDITORIAL BOARD

V.SH. MELIKYAN (editor-in-chief), A.KH. GRIGORYAN (vice-editor-in-chief),
ZH.S. SEYRANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN, L.H. ASLANYAN,
H.V. BAGHDASARYAN, M.K. BAGHDASARYAN, S.P. DAVTYAN,
A.G. GHULYAN, A.A. HAKHUMYAN, V.N. HAKOBYAN, H.S. KARAYAN,
A.T. KUCHUKYAN, V.Z. MARUKHYAN, O.H. PETROSYAN, YU.L. SARGSYAN,
S.H. SIMONYAN

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА
Известия НАН РА и НПУА (сер. техн. наук), 2018

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И НАЦИОНАЛЬНОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

2018

1

ՀԱՏՈՐ

TOM 71
VOLUME

ՀՈՒՆՎԱՐ - ՄԱՐՏ
ЯНВАРЬ - МАРТ

Հրատ. Խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 28.06.2018

Թուղթը՝ «օֆսեթ»։ Տպագրությունը՝ դիզոն: Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16:

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 6.5 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 248: Տպաքանակ՝ 200

Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական
համալսարանի տպարան
Երևան, Տերյան 105,
Հեռ.՝ 520 356

Типография Национального
политехнического университета
Армении
Ереван, ул. Теряна 105,
Тел.: 520 356

Printing house of National
Polytechnic University
of Armenia
105 Teryan str. Yerevan,
Tel. 520 356

М.Э. САСУНЦЯН

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ МОНОСИЛИЦИДА ЖЕЛЕЗА
ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ШЛАКОВ**

Методом высокотемпературного синтеза исследована возможность получения моносилицида железа путем совместного алюминотермического восстановления железо- и кремнийсодержащих производственных шлаков. Выбраны оптимальные условия высокотемпературного синтеза для обеспечения максимального выхода сплава. Определены параметры процесса горения (температура и скорость).

Ключевые слова: шлак, алюминотермия, восстановление, ферросилиций, железо, кремний.

Введение. Развитие экономической базы Армении непосредственно связано с рациональным использованием местных сырьевых материалов и, прежде всего, рудных месторождений. Становление ведущих отраслей народного хозяйства (машиностроения, строительства, транспорта, связи и др.) возможно только лишь при наличии материалов. Исходя из вышеизложенного, необходимо осуществить металлургический передел медно-молибденовых концентратов с извлечением меди и молибдена в виде чистых металлов, сопровождающийся получением ценных металлосодержащих шлаков. Это в первую очередь касается шлаков Алавердийского медеплавильного завода и Ереванского завода “Чистое железо”, содержащих значительное количество железа, кремния и других ценных металлов. На Алавердийском медеплавильном заводе ежегодно получают 34...35 *тыс. т* отвального шлака, содержащего 49,31 % FeO. С другой стороны, большой объем шлаков имеется на Ереванском заводе “Чистое железо” с содержанием 89,00% SiO₂.

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости комплексной переработки этих шлаков с целью извлечения из них ценных составляющих, в первую очередь - железа и кремния, и получения моносилицида железа.

Постановка задачи и методы исследования. Моносилицид железа – это сплав, состоящий из железа и кремния. Он широко используется в производстве стали в процессах раскисления и легирования. Для комплексной переработки указанных шлаков с целью получения ферросилиция предлагается совместное алюминотермическое восстановление содержащихся в отходах оксидов железа и кремния методом высокотемпературного синтеза (ВС) [1].

Очевидные преимущества и перспективность метода ВС послужили основой для его широкого использования при получении различных тугоплавких неорганических веществ, компактных и литых материалов и изделий [1-3].

В отличие от традиционных методов, метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) отличается неоспоримыми преимуществами: простота оборудования и отсутствие внешних энергозатрат; высокие температуры, создаваемые за счет самой химической реакции; малое время синтеза; возможность синтеза соединений высокой чистоты. Кроме того, этот метод минует самый важный производственный вопрос - использование чистых оксидов. Благодаря высоким температурам (2000...2500°C) без дополнительного источника теплоты, простоте технологических процессов (отсутствие сложного оборудования) и отсутствию газообразных выбросов данный метод становится более конкурентоспособным по сравнению с традиционными методами.

В промышленности ферросилиций с высоким содержанием кремния (45...75%) получают традиционными методами в дуговых электропечах [3,4]. Это дорогостоящее и энергоемкое производство, что обусловлено использованием внешних источников тепла (электрические печи или другие нагревательные устройства), а также неполнотой протекания процесса [5,6].

Целью данного исследования является разработка технологии получения моносилцида железа из дешевых производственных отходов в режиме высокотемпературного синтеза.

Эксперименты проводились в реакторе, представляющем собой металлическую емкость, состоящую из двух частей. Нижняя часть наполнена кварцевым песком, верхняя часть представляет собой коническую крышку, открытую сверху. На рис. 1 показан лабораторный реактор.



Рис. 1. Лабораторная СВС установка

Шихта помещается в яму кварцевого песка и закрывается конической крышкой. В центре образца заливается инициатор ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C}$). Горение осуществляется с помощью раскаленной электрическим током вольфрамовой спи-

рали с верхнего торца образца. В этих условиях в поверхностных слоях смеси возбуждается химическая реакция и формируется волна горения, распространяющаяся с постоянной скоростью по всей длине образца, тем самым имеет место СВС. Горение протекает в течение 10...15 с при предельной температуре 2300...2500°C. После охлаждения продукты горения образуют металлическую и шлаковую фазы, причем металлическая фаза представляет собой сплошной кусок, который собирается на дне шлака и легко отделяется от него. После взвешивания металлическая и шлаковая фазы подвергались химическому (определялось содержание железа и кремния) и рентгенофазовому анализам.

Для измерения параметров процесса горения (температуры и скорости) использовалась термопарная методика с применением вольфрамрениевых термопар диаметром 0,2 мм. Управление экспериментом и запись сигналов термопар осуществлялись с помощью персонального компьютера, подключенного к установке.

Микроскопические измерения проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа типа (SEM) VEGA TS 5130MM, Tescan, Czech Republic, Microanalysis Sistem INCA Energy 300, рентгенофазовое исследование – с помощью рентгенографа марки “ДРОН-3,0” с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения и никелевого фильтра в следующем режиме: напряжение - 25 кВ, сила тока - 10 мА, скорость записи – 420 мм·ч⁻¹.

Результаты исследования. Согласно диаграмме состояния Fe-Si [6], железо с кремнием, в основном, могут образовывать три типа соединения: моносилицид - FeSi (33,3 % Si); η -фаза Fe_3Si_2 (25% Si); ϵ -фаза Fe_2Si_5 (55,68 % Si) (рис. 2). Наиболее устойчивым из этих соединений является FeSi. Остальные соединения при высоких температурах разлагаются, образуя Fe и Si.

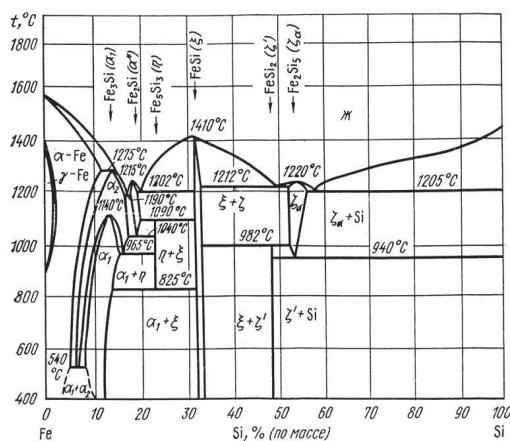


Рис. 2. Фазовая диаграмма Fe-Si

Данные минералогического анализа свидетельствуют, что основными минералами в отвальном шлаке Алавердийского медеплавильного завода являются фаялит ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ или $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) и магнетит (Fe_3O_4) [7].

Предварительные термодинамические расчеты показали, что наиболее вероятны реакции с образованием FeSi , из чего можно сделать вывод, что при высоких температурах более вероятно образование сплава моносилцида железа.

Для совместного алюминотермического восстановления оксидов железа и кремния приготовлена шихта определенного состава, которая, кроме медных и молибденовых шлаков, содержит также другие компоненты. В частности, для увеличения термичности процесса добавляется NaNO_3 , а для шлакообразования - CaO . Добавляется также CaF_2 для увеличения подвижности шихты. Предварительно исследован выход ферросилиция от количества восстановителя (Al), а также от количества CaO и NaNO_3 . Выявлено, что оптимальными условиями при проведении опытов получения силицидов железа является содержание 1,5 г молибденового шлака на 10 г конвертерного, CaO - в избытке 20%, NaNO_3 - 5% от теоретически необходимого количества и 5% CaF_2 от массы шихты.

В результате опытов был получен сплав следующего состава, %: 66,05% Fe, 31,91% Si, 0,04% Al и 2,0% молибдена (что соответствует моль/атомному соотношению 1,19:1,18) с суммарным выходом металла 92,0%.

Полученный сплав был подвергнут рентгенофазовому анализу. Как показывают данные анализа (рис.3), металлическая фаза состоит в основном из рефлексов FeSi ($2,00_{\text{x}}$; $1,82_{\text{x}}$; $1,19_{\text{x}}$ Å) и αFe ($2,03_{\text{x}}$; $1,17_{\text{z}}$; $1,43_{\text{z}}$ Å), что соответствует формуле ферросилиция FeSi . Удельный вес полученного ферросилиция составляет $5,6 \text{ г/см}^3$, а точка плавления - 1420°C , что соответствует формуле моносилцида (FeSi).

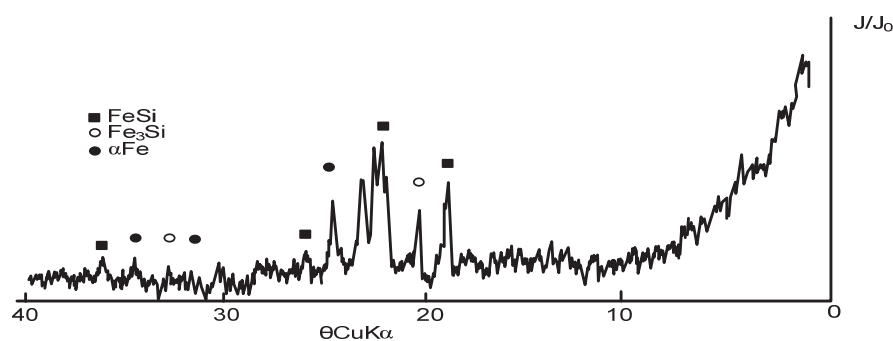


Рис. 3. Рентгенограмма металлической фазы

Результаты экспериментальных исследований показали, что путем совместного алюминотермического восстановления отвального шлака Алавердийского медеплавильного завода и молибденового шлака можно получить ценный железокремниевый сплав с суммарным выходом металла 92,0%.

Следует отметить, что содержание в сплаве 2% молибдена в данном случае имеет преимущество, так как полученный моносилицид может использоваться как восстановитель на указанных двух заводах, где производится ферромолибден. В данном случае возвращаются потери молибдена, содержащиеся в молибденовых отходах (примерно 2...3%).

Исследованы также некоторые вопросы, касающиеся механизма получения ферросилиция методом СВС, в результате чего выявлены промежуточные фазы, образующиеся в процессе получения силицидов железа. Экспериментально определены максимальная температура горения шихты и скорость распространения фронта горения. Исследования проводились при помощи температурных профилей, полученных в результате комплексного алюминотермического восстановления отходов.

Синтез силицидов железа проводился при помощи лабораторного прибора периодического действия. Определенное количество шихты помещалось в кварцевую трубку, находящуюся в кварцевой камере в свободном или спрессованном состояниях, где на определенном расстоянии друг от друга (22 мм) размещались 4 W-Re термопары. Полученные от термопар сигналы обрабатывались при помощи сигнального усилителя, усиленный сигнал поступал в цифровой преобразователь марки Ni-USB-625M, результаты поступали в компьютер и обрабатывались при помощи программы Lab View.

Исследованы температурные профили в зависимости от количества восстановителя (80, 100, 120%), большего и меньшего от теоретически необходимого количества. Здесь выделяются три следующих этапа: плавление алюминия, химическая реакция восстановления оксидов железа и кремния и взаимная диффузия восстановленного металлического железа и кремния.

На протяжении этих этапов происходят разнообразные экзо- и эндотермические явления, связанные с плавлением алюминия, синтезом сплава, т.е. с постепенным восстановлением и разрушением кристаллической решетки оксидов железа и кремния (рис. 4а). Тепловые явления особенно усиливаются при увеличении количества восстановителя (рис 4б и в). Во всех случаях реакция завершается сильным экзотермическим эффектом, что, по-видимому, связано с окончательным разрушением кристаллических решеток оксидов и образованием металлического ферросилиция.

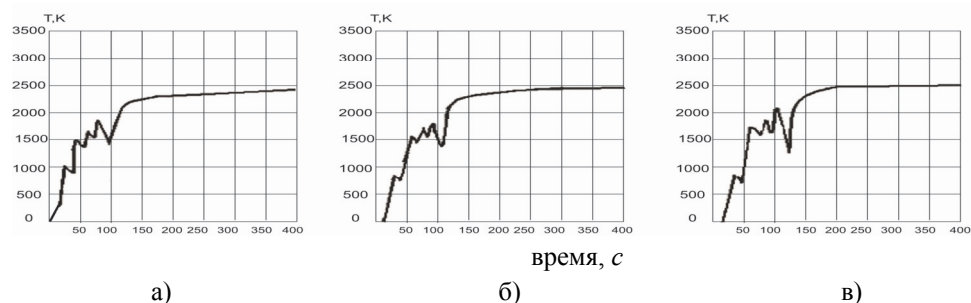


Рис. 4. Температурные профили, полученные алуминотермическим восстановлением производственных отходов в зависимости от количества восстановителя от стехиометрии: а - 80%, б – 100%, в – 120%

Исходя из сложного вида профилей, предлагается приближенный механизм получения силицидов железа. В начале процесса восстановления преобладает количество расплавленного железа, в результате чего получаются богатые железом фазы. Затем количество восстановленного силиция постепенно увеличивается, и, как следствие, повышается скорость диффузионных процессов. Вследствие восстановления SiO_2 жидкое железо и кремний образуют FeSi . В случае, когда все железо расходуется на получение FeSi и кремний остается в избытке, образуются краткосрочные фазы FeSi_2 , Fe_2Si_5 , которые не влияют на образование основной фазы. При взаимодействии этих фаз происходит упорядочение кристаллической решетки, в результате чего образуется более стабильный FeSi силицид. На рис. 4 а,б,в графически определены максимальная температура горения шихты (2500°C) и скорость горения фронта ($U_{\text{мин}}=22/88=0,25 \text{ мм/с}$, $U_{\text{макс}}=22/55=0,40 \text{ мм/с}$).

Таким образом, регулируя количество восстановителя и режимы структурообразования, можно получить тот или иной стехиометрический силицид. Одновременно решены вопросы, касающиеся механизма получения силицидов железа методом алуминотермического восстановления оксидов железа и кремния в режиме ВС.

Выводы. Исследован процесс получения ферросилиция путем совместного алуминотермического восстановления производственных шлаков действующих металлургических заводов методом высокотемпературного синтеза. Показано, что при соотношении отвального и молибденового шлаков – 3:1 при избытке Al и CaO – 20% от теоретически необходимого количества и содержании NaNO_3 5% от массы шихты получается сплав следующего состава, %: 62,41 Fe, 37,35 Si и 0,04% Al, суммарный выход металла 92,0%. Данные рентгенофазового анализа показали, что металлическая фаза состоит в основ-

ном из рефлексов FeSi. Удельный вес полученного ферросилиция - $5,6 \text{ г/см}^3$, а точка плавления - 1420°C , что соответствует формуле моносилицида (FeSi).

Предложен приближенный механизм получения ферросилиция из промышленных отходов методом высокотемпературного синтеза. Показана принципиальная возможность получения качественного ферросилиция из промышленных отходов методом ВС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках Армяно-Белорусского совместного научного проекта № АБ16 - 48.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мержанов А.Г., Юхвид В.И., Боровинская И.П.** // ДАН СССР.- 1980.- Т. 255, №1.- С.120.
2. **Юхвид В.И.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Теория и практика / Под ред. А.Е. Сычева.- Черноголовка: Территория, 2001.- 252 с.
3. **Рысс М.А.** Производство ферросплавов.- М.: Металлургия, 1975.- 435 с.
4. **Дуррер Р., Фолькерт Г.** Металлургия ферросплавов. -М.: Металлургия, 1976.- 479 с.
5. **Тарасов А.Г., Горшков В.А., Юхвид В.И.** // Тезисы докладов Второй Всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых.- Черноголовка, 2004.- С.26.
6. **Пленер Ю.Л., Сучильников С.И., Рубинштейн Е.А.** Аллюминотермическое производство ферросплавов и лигатур. - М.: Металлургия, 1963.- 175 с.
7. **Martirosyan V., Sasuntsyan M.** Complex mineralogical investigation of copper and molibdenium slags inthe acting metallurgical plants of Armenia // Yale Journal of Science and Education.- Yale University Press, Jenuary-June 2016.- Vol. 10, № 1(18). -P. 413-420 (ISSN: 0044:0093).

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 05.03.2018.

Մ.Է. ՍԱՍՆԻՑՅԱՆ

ԵՐԿԱԹԻ ՄՈՆՈՍԻԼԻԿԻԴԻ ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՄԻՆԹԵԶԸ
ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԽԱՐԱՄՆԵՐԻՑ

Բարձրջերմաստիճանային սինթեզի (ԲՄ) եղանակով ուսումնասիրվել է երկաթի մոնոսիլիցիդի ստացման գործընթացի հնարավորությունը՝ արտադրական խարամների համատեղ ալյումինաթերմային վերականգնման եղանակով: Ընտրվել են բարձրջերմաստիճանային սինթեզի օպտիմալ պայմանները, որոնք ապահովում են երկաթի մոնոսիլիցիդի ստացումը առավելագույն ելքով: Որոշվել են այրման գործընթացի վրա ազդող գործոնները (ջերմաստիճանը և արագությունը):

Առանցքային բառեր. խարամ, ալյումինաթերմիա, վերականգնում, ֆերոսիլիցիում, երկաթ, սիլիցիում:

M.E. SASUNTSYAN

HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF IRON MONOFERROSILICIDE
FROM PRODUCTION WASTES

By the method of high-temperature synthesis, the possibility of obtaining iron monosilicide by combined aluminothermal reduction of iron and silicon-containing production slags is investigated. The optimal conditions of high – temperature synthesis are selected to ensure the maximum yield of the alloy. The burning process parameters (temperature and speed) are defined.

Keywords: slag, aluminothermy, reduction, ferrosilicium, iron, silicon.

Դ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՊՂՆՁԻ ԿՈՒՅՏԱՅԻՆ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՈՒՄԸ ԵՎ ԷՔՍՏՐԱԿՑԻՈՆ ԿՈՐՁՈՒՄԸ
ՕՔՍԻԴԱՑԱԾ ՊՂՆՁԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՑՈՒԹԵՐԻՑ

Ներկայացվել են թույլ ծծմբաթթվային լուծույթով օքսիդացած պղնձային հանքանյութի կույտային տարրալուծմամբ պղնձի կորզման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները: Ցույց է տրվել տարրալուծման Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O սուլֆատ-թթվային լուծույթից տարբեր օրգանական էքստրագենտներով պղնձի ընտրողական կորզման եղանակի արդյունավետությունը: Որպես տարրալուծման լուծույթից պղնձի կորզման այլընտրանք է երաշխավորված երկաթով ցեմենտացման մեթոդը:

Առանցքային բառեր. օքսիդացած պղնձային հանքանյութ, կույտային տարրալուծում, էքստրակցիա, ցեմենտացում, ընտրողական կորզում:

Ներածություն. Հետազոտության համար որպես ելանյութ հանդիսացող օքսիդացած պղնձային հանքանյութի ուղղակի թույլ (մոտ 2 %-անոց) ծծմբաթթվային տարրալուծման լուծույթում պղինձն անցնում է բացարձակապես իր երկվալենտ սուլֆատի (CuSO_4) տեսքով, որը բարենպաստ պայման է՝ հիդրոմետալուրգիական եղանակներով այդ մետաղի արդյունավետ կորզման համար:

Աշխատանքի նպատակն է հետազոտել տեղական օքսիդացած հանքանյութից պղնձի կորզման գործընթացը՝ կիրառելով հանքանյութի կույտային տարրալուծում թույլ ծծմբական թթվի ջրային լուծույթով, և գոյացած սուլֆատաթթվային լուծույթից պղնձի իոնների էքստրակցիա՝ հարմարավետ օրգանական էքստրագենտով:

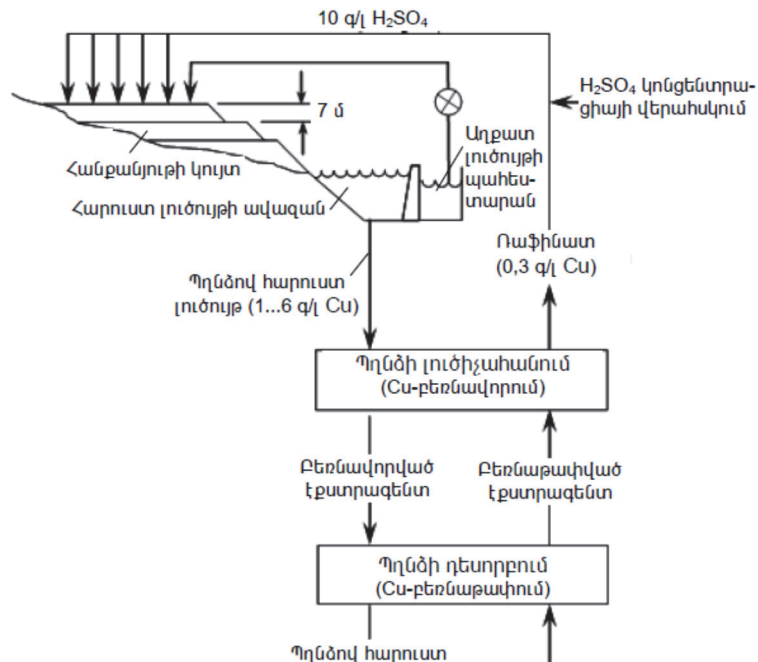
Փորձարկման մեթոդները. Մետաղական իոնների կոնցենտրացիաները լուծույթներում չափվել են ատոմա-աբսորբման սպեկտրադիտական մեթոդով (AAS): Հիմնական և օժանդակ բաղադրիչների պարունակությունները պինդ արգասիքներում որոշվել են քիմիական և էմիսիոն-սպեկտրային վերլուծության եղանակներով: Պինդ նյութերի ֆազային բաղադրություններն ուսումնասիրվել են ռենտգենաֆազային վերլուծության մեթոդով:

Հետազոտության արդյունքների քննարկումը. Ինչպես հայտնի է [1], հանքային պղնձի մոտ 80 %-ը ստացվում է հանքաքարերի ֆլոտացման, խտանյութերի հալման, շտեյնի կոնվերտացման և կիսամաքուր պղնձի ռաֆինացման միջոցով: Սա այն դեպքն է, երբ արդյունահանվող հանքաքարերում պղինձը հանդես է գալիս հիմնականում սուլֆիդների տեսքով, այդ թվում՝ խալկոպիրիտը

(CuFeS_2 , տեսականորեն 34,6 % Cu պարունակությամբ) և բորնիտը (Cu_5FeS_4 , 63,3 % Cu) (CuFeS_2), ինչպես նաև երկրորդային միներալներից՝ խալկոզինը (Cu_2S , 79,9% Cu) և կովելինը (CuS , 66,5% Cu): Մակայն այդ տեխնոլոգիան ամեննին պիտանի չէ օքսիդացած հանքանյութերի դեպքում, ինչպիսին է, օրինակ, Թեղուտի հանքային մարմնի վերին հորիզոններից արդյունահանվող հանքաքարը, որի հիմնական պղնձային միներալներն են կուպրիտը (Cu_2O , 88,8% Cu) և տենորիտը (CuO , 79,9% Cu), որոնք լավագույն ձևով տարրալուծվում են ծծմբական թթվի թույլ լուծույթներում: Ընդ որում, հանքանյութերում առկա չնչին քանակությամբ սուլֆիդային միներալները նույնպես կարող են տարրալուծվել ծծմբական թթվով, կիրառելով երկաթի եռավալենտ սուլֆատը ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)՝ որպես օքսիդարար ագդանյութ [2]:

Նշված հանքանյութը կարելի է դասել պղնձի աղքատ հանքանյութերի ($\approx 0,5$ % Cu) շարքը, որոնց տարրալուծումը կույտերում մեծ մասամբ կատարվում է ծծմբական թթվի նոսր ջրային լուծույթի անձրևանման կաթիլներով: Կարելի է կիրառել նաև ծծմբաթթվային լուծույթի կոլեկտորային ծորացումը հանքանյութի շեղջի (կույտի) միջով: Պղնձի օքսիդային միներալներն արագորեն լուծվում են ծծմբական թթվով՝ գոյացնելով սուլֆատաթթվային լուծույթ:

Նկ.-ում ցույց է տրված օքսիդացած հանքանյութի կույտային տարրալուծման և էքստրակցիայի (լուծիչահանում) գործընթացների ընդգրկմամբ պղնձի կորզման տեխնոլոգիական ցիկլի սխեման:



Նկ. Օքսիդացած հանքանյութից պղնձի կորզման տեխնոլոգիական սխեման

Տեխնոլոգիական սխեմայի գլխավոր բաղադրիչը՝ վերամշակվող հանքանյութի կույտային տարրալուծման գործընթացը, ներառում է ջարդված հանքաքարի կույտաձև զանգվածում առկա օքսիդային միներալներից պղնձի (ինչպես նաև այլ լուծելի մետաղների) առանձնացումը թույլ ծծմբական թթվի ($\sim 10 \text{ գ/լ H}_2\text{SO}_4$) ջրային լուծույթով, որի արդյունքում գոյանում է մետաղների հետագա կորզման համար հարմարավետ սուլֆատաթթվային լուծույթ: Այդ պայմաններում, ինչպես հայտնի է, հեշտությամբ տարրալուծվում են պղնձի օքսիդները (Cu_2O , CuO), ինչպես նաև (գործնականորեն շատ դանդաղ) որոշ սուլֆիդներ, ինչպիսիք են խալկոզինը (Cu_2S), կովելինը (CuS) և այլն: Չափազանց դժվարլուծելի է պղնձի միներալներից խալկոպիրիտը (CuFeS_2) և բորնիտը (Cu_5FeS_4), որոնց տարրալուծման համար պահանջվում է ունենալ ավելի բարձր ջերմաստիճաններ և ճնշումներ (որպեսզի քայքայվեն դրանց բյուրեղավանդակները, և պղինձն անցնի սուլֆատաթթվային լուծույթ), չնայած այս խնդիրն էլ լուծելի է, եթե լուծույթում ավելացվի նաև ոչ մեծ քանակությամբ երկաթի եռավալենտ սուլֆատ ($1,0 \dots 1,2 \text{ գ/լ Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)՝ կախված հանքանյութում առկա սուլֆիդների կոնցենտրացիայից):

Հաշվի առնելով հետազոտվող լուծույթում պարունակվող մետաղ-իոնների վերականգնման ռեակցիաների ստանդարտ էլեկտրոդային պոտենցիալների զգալի մոտիկությունը (օրինակ, $E^\circ_{\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}} = 0,340 \text{ Վ}$, իսկ $E^\circ_{\text{Fe}^{3+} + 3e = \text{Fe}^{2+}} = 0,771 \text{ Վ}$ [2])՝ որպես վերականգնիչի միջոցով ռեակցիայի լիարժեք ընտրողականությանը խանգարող գործոն, լուծույթից պղնձի ընտրողական կորզման գործընթացը հետազոտվել է տեխնոլոգիական երկու տարբերակների՝ «էքստրակցիա-ռեէքստրակցիա» և «ցեմենտացում» մեթոդների համադրմամբ՝ դրանց արդյունքների հիման վրա արտադրական պայմանների համար առավել օպտիմալ գործընթացի երաշխավորման նպատակով:

Աղյուսակ 1

Տարրալուծման հեղուկ արգասիքի (մայրակ-լուծույթի) իոնային բաղադրությունը

Իոնների կոնցենտրացիաները սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման լուծույթում (գ/լ)				
Cu^{2+}	Zn^{2+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Pb^{2+}
9,25	0,06	հետքեր	0,86	չի հայտնաբեր.

Փորձարկումների առաջին փուլում, էքստրակցիայի-ռեէքստրակցիայի եղանակով [3, 4] լուծույթում առկա Cu^{2+} իոնների կորզման փորձերում, ժամանակակից պրակտիկայում հայտնի «aldoximes-ketoximes» դասի օրգանական էքստրագենտների դժվարամատչելիության պատճառով, դրանց փոխարեն օգտագործվել են զտված բուսական յուղեր (ձիթապտղի, եգիպտացորենի, արևածաղկի, սոյայի), որոնք, ըստ [5] արտոնագրի հեղինակների, պղնձի երկվալենտ իոնների համե-

մատ նույնպես օժտված են բարձր կատիոնափոխանակիչ ընտրողականությամբ այլ մետաղների (հատկապես երկաթի) իոններ պարունակող ջրային միջավայրերում: Այդ նպատակով սկզբում պղինձը կորզվել է 8 գ/լ Cu^{2+} , 8 գ/լ Fe^{2+} , 0,5 գ/լ Fe^{3+} և 0,6 գ/լ Zn^{2+} բաղադրությամբ մոդելային ջրային լուծույթից, որի պատրաստման համար օգտագործվել են ռեակտիվային $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ և $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ինչպես նաև տեխնիկական մաքրությամբ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ սուլֆատներ: 200-ական մլ ծավալով լուծույթի փորձանմուշների ավելացվել է 80-ական մլ ծավալով էքստրագենտ (բուսական յուղ) և խառնվել 4,5 ժամ տևողությամբ մթնոլորտային ճնշման և սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում, խառնուրդի pH-ը պահելով 10,5...11,0 սահմաններում (NaOH -ի պարբերաբար ներմուծմամբ): էքստրակցիայից հետո խառնուրդները թողնվել են հանգստանալու 24 ժամվա ընթացքում, որպեսզի օրգանական և ջրային ֆազերը առանձնանան միմյանցից: Հանգստից հետո փորձանոթների վերին մակարդակներում կուտակված օրգանական ֆազերը (Cu^{2+} իոններով հագեցած էքստրագենտները) խնամքով անջատվել են ջրային ֆազերից: AAS մեթոդով չափվել են Cu^{2+} -իոնների մնացորդային կոնցենտրացիաները ջրային ֆազերում, և յուրաքանչյուր փորձի համար որոշվել է էքստրակցիայի ժամանակ Cu^{2+} իոնների բաշխման գործակիցը՝

$$D_{\text{բաշխ}} = C_{\text{օրգ}}/C_{\text{ջր}}, \quad (1)$$

որտեղ $C_{\text{օրգ}}$ -ն օրգանական ֆազ անցած պղնձի կոնցենտրացիան է, $C_{\text{ջր}}$ -ը՝ ջրային ֆազում մնացած պղնձի կոնցենտրացիան:

Պղնձի ռեէքստրակցիան Cu^{2+} իոններով հագեցած օրգանական մասից իրականացվել է թորած ջրով պատրաստված ուժեղ ծծմբաթթվային լուծույթով (230 գ/լ H_2SO_4)՝ միատեսակ ջերմաստիճանային և ժամանակային պայմաններում: Ընդ որում, ռեէքստրակցիայի լուծույթի ծավալը վերցվել է 2 անգամ ավելի պակաս (100 մլ), քան էքստրակցիայի լուծույթինը, որպեսզի ապահովված լինի դրանում պղնձի հարմար կոնցենտրացիա՝ հետագա էլեկտրակորզման համար: Պղնձի իոններից բեռնաթափված էքստրագենտների հեռացումից հետո ստացված ջրային ֆազերում (ռեէքստրակտներում) AAS վերլուծության մեթոդով չափվել են Cu^{2+} իոնների կոնցենտրացիաները: Երկաթի ու ցինկի իոնների առկայությունը դրանցում պարզաբանվել է որակական քիմիական վերլուծության միջոցով:

Ցեմենտացման (քիմիական նստեցման) եղանակով [6] ելային լուծույթից (աղ. 1) պղնձի անմիջական կորզումը՝



ռեակցիայով կատարվել է երկաթի տաշեղների միջոցով (սենյակային ջերմաստիճանում, լուծույթի անընդհատ խառնումով 30 րոպեի ընթացքում): Ցեմենտատը (պղնձափոշին) առանձնացվել է երկաթյա տաշեղներից ու լուծույթից տղմաթափ-

ման և ֆիլտրման միջոցով լվացվել է 0,5%-անոց ծծմբաթթվային լուծույթով (տեսքի պայծառեցման համար), այնուհետև մաքրվել է 2% - անոց սոդայի (Na_2CO_3) լուծույթով և չորացվել 110 °C- ում 2 ժամ/ա ընթացքում: Ստացված պղնձափոշին ենթարկվել է ռենտգենակառուցվածքային և էմիսիոն-սպեկտրային վերլուծության: Պղնձի կորզումից հետո ֆիլտրված լուծույթում որոշվել է Cu^{2+} իոնների մնացորդային կոնցենտրացիան, և հաշվվել է պղնձի ցեմենտացման (կորզման) գործակիցը.

$$K_{\text{Cu ցեմ}} = M_{\text{Cu ցեմ}} / M_{\text{Cu ցր}}, \quad (3)$$

որտեղ $M_{\text{Cu ցեմ}}$ -ն մաքուր պղնձափոշու զանգվածն է ցեմենտատում, $M_{\text{Cu ցր}}$ -ն՝ պղնձի ընդհանուր զանգվածը ելային ջրային լուծույթում: Վերլուծությունների և հաշվարկների արդյունքները բերված են աղ. 2-ում:

Էքստրակցիայի և ցեմենտացման եղանակներով ստացված փորձնական արդյունքների համադրությունը ցույց է տալիս, որ սկզբունքորեն այդ երկուսն էլ կիրառելի են սուլֆատ-թթվային լուծույթներից պղնձի կորզման դեպքում:

Ընդ որում, կարելի է հաստատագրել, որ «Էքստրակցիա» - «ռեէքստրակցիա» գործընթացի համար լավագույն էքստրագենտ է եգիպտացորենի յուղը՝ $D_{\text{բաշխ}} = 1599$ ցուցանիշով (վատագույն էքստրագենտը սոյայի յուղն է, որի դեպքում $D_{\text{բաշխ}} = 65$), ինչը համեմատելի է գրականության տվյալների հետ [5]:

Տարրալուծման լուծույթից երկաթով ցեմենտացման դեպքում պղնձի կորզման գործակիցը հասնում է 99,1 %-ի, որը նույնպես լիովին ընդունելի ցուցանիշ է մետաղի նվազագույն կորստի ապահովման տեսակետից:

Աղյուսակ 2

Էքստրակցիայի և ցեմենտացման մեթոդներով Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O լուծույթներից պղնձի կորզման տվյալների համադրությունը

Էքստրագենտի կամ ցեմենտացնողի տեսակը	Էքստրակցիա կամ ցեմենտացում		Ռեէքստրակցիա կամ ֆագերի բաժանում		Cu^{2+} իոն. մնացորդ. կոնցենտ. լուծույթում (q/l)*	Երկաթի առկայութ. էքստրակտում	Ցինկի առկայութ. էքստրակտում	$D_{\text{բաշխ}}$ կամ $K_{\text{ցեմ}}$
	Լուծույթի pH-ը	Տևող. ժամ	Լուծույթի pH-ը	Տևող. ժամ				
Արևածաղկի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,070	Շատ	Շատ	113
Սոյայի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,120	Շատ	Շատ	65
Ձիթապտղի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,020	Շատ	Քիչ	399
Եգիպտացորենի յուղ	10,5...11,0	4,5	4,0...4,5	4,5	0,005	Շատ	Քիչ	1599
Ցեմենտացում երկաթի տաշեղներով	5,5...6,5	0,5	Պղնձի առանձնացում, լվացում, չորաց.		0,180	-	-	0,991

Սակայն էքստրակտների բաղադրությունների վերլուծությունից պարզվում է, որ դրանցում առկա է շատ կամ քիչ քանակությամբ երկաթ, ինչպես նաև ցինկ, որոնք, անշուշտ, կարող են հետագա էլեկտրոլիզի ժամանակ աղտոտել պղնձի կաթոդային նստվածքը: Դրանից հետևում է, որ էքստրակցիայի մեթոդով (եզիպ-տացորենի յուղով) հնարավոր է Cu^{2+} - Zn^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O համակարգի լուծույթներից պղինձը կորզել գրեթե ամբողջությամբ, բայց ոչ լիարժեք մաքուր վիճակում: Ակնհայտ է, որ առաջին հերթին դրան խանգարում են լուծույթում առկա Fe^{3+} իոնները, որոնք փոխազդելով լուծույթի pH-ը կարգավորող NaOH -ի հետ, ունակ են $\text{Fe}(\text{OH})_3$ թաղանթներ գոյացնելու օրգանական մասի մակերեսին, իսկ Zn^{2+} իոնները, իրենց հերթին, հավանաբար, լուծված օդի թթվածնի առկայությամբ մասնակիորեն օքսիդանում են՝ գոյացնելով $\text{Zn}(\text{OH})_2$ թաղանթներ:

Մինչդեռ արդյունքներից երևում է, որ ցեմենտացման պրոցեսը գերծ է նշված թերություններից, ինչը, ակնհայտորեն, պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ այս դեպքում ցինկը չի կարող խանգարել պղնձի քիմիական վերականգնմանը երկաթով, քանի որ շատ մեծ է Cu^{2+} և Zn^{2+} իոնների վերականգնման ռեակցիաների ստանդարտ էլեկտրոդային պոտենցիալների տարբերությունը (համապատասխանաբար -0,763 Վ և 0,340 Վ), առավել ևս երկաթը խանգարիչ չէ, քանի որ ինքն է պղնձը նստեցնողը (ցեմենտարարը): Սակայն այս դեպքում նաև, որպես կանոն, վերջնական արգասիքը ստացվում է որոշ չափով աղտոտված (մասնավորապես երկաթով):

Փորձի տվյալներով՝ երկաթի տաշեղներով պղնձի ցեմենտացման (կորզման) գործակիցը հասնում է 99,1 %, ինչը նույնպես ընդունելի ցուցանիշ է:

Հետազոտված Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O տարրալուծման լուծույթից պղնձի արդյունավետ կորզումից հետո մնացած սուլֆատաթթվային լուծույթն իր կազմով ավելի հարմար է հետագայում երկաթի և ցինկի ընտրողական կորզման համար:

Եզրակացություն.

1. Օքսիդացած հանքանյութերից պղնձի արդյունավետ կորզման համար երաշխավորվում է ջարդված հանքաքարի կույտային տարրալուծումը՝ թույլ ծծմբաթթվային լուծույթով, այնուհետև գոյացած Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O լուծույթից պղնձի ընտրողական առանձնացումը՝ «էքստրակցիա – ռեէքստրակցիա» մեթոդով:
2. Կույտային տարրալուծման սուլֆատ-թթվային լուծույթից պղնձի կորզման հավասարազոր այլընտրանքային եղանակ է երկաթի տաշեղներով ցեմենտացումը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport.** Extractive Metallurgy of Copper.-Fifth Edition.- Elsevier Ltd, 2011.- 456 p.
2. **Մարգարյան Լ.Ե.** Մետալուրգիական հեռանկարային տեխնոլոգիական գործընթացներ: Մաս 2:-Ե.: Ճարտարագետ, 2005.- 210 էջ:
3. **Hurtado-Guzma՛n, C., & Menacho, J.M.** Oxime degradation chemistry in copper solvent extraction plants / P.A. Rivieros, D.G. Dixon, D.B. Dreisinger & J.H. Menacho (Eds.) // Copper-Cobre.- 2003-Vol. VI, book 2: Hydrometallurgy of copper: Modelling, impurity control and solvent extraction.-Montreal, 2003.- P. 719-734.
4. **Tinkler, O. S., Cronje, I., Soto, A., Delvallee, F., & Hangoma, M.** The ACORGA OPT-series: industrial performance vs. aldoxime: ketoxime reagents. In ALTA copper 2009.-Melbourne, Australia: ALTA Metallurgical Services, 2009.
5. **Патент РФ № 2155818.** Способ экстракции меди из водных растворов.- 10.06.1999.
6. **Смирнов И.И.** Физико-химические основы и технология получения порошков тяжелых цветных металлов.- Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1984.-128 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 09.01.2018:

Д.Г. ВАРДАНЫАН

КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ И ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД

Представлены технологические особенности извлечения меди из окисленных медных руд путем кучного выщелачивания слабым сернокислотным раствором. Показана эффективность метода избирательного извлечения меди различными органическими экстрагентами из сульфатно-кислого раствора Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O выщелачивания. В качестве альтернативы для извлечения меди из раствора выщелачивания рекомендован метод цементации железом.

Ключевые слова: окисленная медная руда, кучное выщелачивание, экстракция, цементация, избирательное извлечение.

D.G. VARDANYAN

HEAP LEACHING AND EXTRACTION RECOVERY OF COPPER FROM OXIDIZED COPPER ORES

The technological peculiarities of copper recovery from oxidized copper ores by heap leaching with weak sulphuric acid solution are presented. The expediency of the method for the selective recovery of copper from the Cu^{2+} - Fe^{3+} - Zn^{2+} - SO_4^{2-} - H_2O sulphate-acidic solution by various extractants is shown. As an alternative to the recovery of copper from the leaching solution, a method of cementation by iron is recommended.

Keywords: oxidized copper ore, heap leaching, extractive method, cementation, selective extraction.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ն.Ա. ՕՐԴՅԱՆ, Խ.Վ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ

ՀԱԼՈՓԵՆԱՑԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ ԱԼՄԱՍՏԱՑԻՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐԻ ՄԵՏԱՂԱՊԱՏՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՏԵՄԱԿԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ցույց է տրված, որ միաբաղադրիչ համակարգում նույնիսկ առաջին կարգի պարզեցված ռեակցիաները շատ դժվար է իրականացնել փորձնականորեն, իսկ բազմաբաղադրիչ համակարգերն առավել ևս դժվար են և անկանխատեսելի: Ավելի բարձր կարգի ռեակցիաները, որոնք բնութագրական են մետաղապատման գործընթացին, ունեն ոչ գծային դիֆերենցիալ հավասարումների տեսք, որոնց կիրառումը պրակտիկորեն հնարավոր չէ:

Կատարվել է հալոգենային միջավայրում ալմաստային հատիկների մետաղապատման ընթացքում տեղի ունեցող նյութատեղափոխության ռեակցիաների տեսական վերլուծություն, որից ելնելով՝ գործընթացի փուլայնությունը ներկայացվել է առաջին կարգի ռեակցիաներով, համաձայն որի՝ մետաղապատման իրականացվում է միակողմանի նյութատեղափոխությամբ:

Առանցքային բառեր. ալմաստային հատիկ, հալոգենային միջավայր, ադսորբում, դիֆուզիա, դեսորբում, նյութատեղափոխություն, մետաղապատում, կապակցանյութ, գործիք, ամրություն, մաշակայունություն:

Ներածություն. Ժամանակակից քարամշակման արտադրությունում լայն կիրառություն են գտել ալմաստային գործիքները, որոնց ներկայացվող պահանջներն են բարձր արտադրողականությունը, օգտագործման արդյունավետությունը, հուսալիությունը և կայունությունը: Այդ իսկ պատճառով նշված պահանջները բավարարող նոր գործիքների ստեղծումը խիստ արդիական խնդիր է:

Ներկայումս գոյություն ունեն ալմաստային հատիկներով կոմպոզիտային նյութերի ստացման բազմաթիվ տեխնոլոգիաներ, որոնց հիմնական թերությունը կոմպոզիտում ալմաստային հատիկների ոչ արդյունավետ օգտագործումն է: Ալմաստը, լինելով չեզոք նյութ, ալմաստամետաղական կոմպոզիտների կապակցանյութերում պահվում է միայն մեխանիկական կապի միջոցով, մինչդեռ ալմաստային հատիկի հուսալի պահման և արդյունավետ օգտագործման համար դա բավարար չէ: Այս երևույթը նվազեցնելու կամ բացառելու նպատակով ալմաստային հատիկները նախօրոք պետք է ենթարկվեն մետաղապատման, որը հնարավորություն կտա բարձրացնել ոչ միայն ալմաստի հատիկների ամրությունը, այլ նաև ստեղծել ամուր կապ ալմաստային հատիկների և կապակցանյութի միջև: Այս առումով խիստ հեռանկարային է հալոգենային միջավայրում ալմաստային հատիկների մետաղապատման գործընթացի տեսական հիմնավորումը:

Ելնելով վերոհիշյալից, աշխատանքի նպատակն է տեսական հետազոտությամբ հիմնավորել հալոգենային միջավայրում ալմաստային հատիկների մետաղապատման գործընթացը և բացահայտել հիմնական օրինաչափություններն ու առանձնահատկությունները:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Կապակցանյութերն ամրացնում և պահում են ալմաստային հատիկները մշակող գործիքի աշխատանքային շերտում, ընդ որում, ալմաստային գործիքի աշխատունակությունը հիմնականում կախված է կապակցանյութի հատկություններից, որն ընտրվում է՝ կախված մշակվող նյութի հատկություններից, գործիքի տիպից և աշխատանքային ռեժիմներից: Քարամշակման գործիքների օգտագործման արդյունավետության բարձրացման նպատակով դրանցում առկա ալմաստային հատիկները ենթարկվում են մետաղապատման կամ ուլտրաձայնային և այլ տեսակի մշակման: Ի տարբերություն չմետաղապատված ալմաստային հատիկներով կոմպոզիտային նյութերի, որոնցում ալմաստի հատիկները պահվում են միայն մեխանիկական կապի միջոցով, մետաղապատված ալմաստային հատիկներով կոմպոզիտային նյութերում ալմաստի հատիկների պահման ամրությունը, հետևաբար՝ նաև այդ նյութերից պատրաստված գործիքի կայունությունը, շատ մեծ է: Ալմաստային հատիկի մետաղապատումից հետո «ալմաստ-մետաղածածկույթ-կապակցանյութ» անցումային շերտերում թրջման գործընթացը բարելավվում է, և ստեղծվում քիմիական կապ: Ալմաստի հատիկների մետաղապատումը բարձրացնում է ալմաստահատիկի ամրությունը, նպաստում է ջերմության արագ հեռացմանը «մշակող ալմաստային գործիք - մշակվող նյութ» գոտուց, մեծացնում է կապակցանյութում ալմաստային հատիկի կառչման ուժը, փոքրացնում ալմաստային հատիկի գրաֆիտացման գործընթացը և այլն: Ծածկութապատող մետաղը լցվում է ալմաստային հատիկում գոյություն ունեցող միկրոճաքերի մեջ և մեծացնում ալմաստային հատիկի ամրությունը [1-3]:

Մետաղապատման համար նախատեսված ծածկույթները պայմանականորեն կարելի է բաժանել երեք խմբի՝ մետաղական, ոչ մետաղական և կոմպոզիտային: Առավել լայն կիրառություն են գտել մետաղական ծածկույթները: Մետաղապատումը կատարվում է էլեկտրոլիտիկ, մետաղների կարբոնիլների քայքայման կամ պլազմաքիմիական եղանակներով, ինչպես նաև վակուումային միջավայրում՝ հեղուկ մետաղների հալույթով, կատոդային փոշոտումով, էլեկտրոնապլազմային գոլթիացման ու խտացման եղանակներով և այլն: Ծածկույթները կարող են լինել միաշերտ, երկշերտ և բազմաշերտ, ընդ որում, ալմաստային հատիկների մետաղապատումն իրականացվում է կաշուն-ակտիվ միաշերտ կամ բազմաշերտ ծածկույթներով: Սկզբում ալմաստի հատիկը պատվում է ֆերոմագնիսական մետաղի շերտով, որից հետո հատիկի տարբեր մասերում տարբեր

հաստությամբ մետաղ է նստեցվում, որի արդյունքում ստացվում են սնկաձև հատիկներ [4]: Ընդ որում, մետաղական ծածկույթի նյութի ընտությունը պայմանավորված է մշակող գործիքի տեխնիկական պահանջներով, գործիքում օգտագործվող կապակցանյութով: [5, 6] աշխատանքներում հիմնավորվել է, որ ալմաստային հատիկների մետաղապատումը բարձրացնում է դրանց ամրությունը, մեծացնում կարծրությունը, ջերմահաղորդականությունը, ալմաստային շերտի հարվածային մածուցիկությունը, մետաղապատման շնորհիվ ստեղծվում է ալմաստային հատիկների և մետաղական կապակցանյութի միջև ամուր կապ, և հետևաբար՝ մեծանում է նաև ալմաստային հատիկներից կազմված մշակող գործիքի երկարակեցությունը: Կախված ալմաստային հատիկների մակնիշից և հատիկայնությունից, մետաղապատումից հետո դրանց ամրությունը կարող է բարձրանալ 1,3...2 անգամ: Դա պայմանավորված է նրանով, որ ալմաստային հատիկում գոյություն ունեցող արատները լցնելուց ու ամրացնելուց հետո ալմաստային հատիկի վրա մետաղի շերտի ավելացումը նպաստում է ամրության հատկությունների մեծացմանը:

Հետազոտության արդյունքները. Ալմաստային հատիկների մետաղապատման ժամանակ նյութատեղափոխության ռեակցիաներն ընդգրկում են հետևյալ փուլերը՝

1. ծածկութապատող մետաղի քլորացում ($\text{Me}\Gamma$),
 2. ծածկութապատող մետաղի քլորիդների ($\text{Me}\Gamma$) դիֆուզիա, որն ընթանում է հատիկի մակերևույթում,
 3. ծածկութապատող մետաղի քլորիդների ($\text{Me}\Gamma$) և H_2 -ի ադսորբում հատիկի մակերևույթում,
 4. քիմիական ռեակցիա ադսորբված նյութերի միջև ($\text{Me}\Gamma + \text{H}_2$), որն ուղեկցվում է Me^* և $\text{H}\Gamma$ -ի առաջացումով,
 5. հատիկի մակերևույթից ռեակցիայի արգասիքների ($\text{H}\Gamma$) դեսորբում:
- Նյութատեղափոխության ռեակցիաների փուլայնությունը կարելի է ներկայացնել որպես առաջին կարգի ռեակցիա, հատկապես՝



որտեղ Me^* -ն ալմաստի մակերևույթին ծածկույթ առաջացնող մետաղն է ատոմային վիճակում, C^* -ն՝ ալմաստի մակերևույթին առաջացած գրաֆիտը ատոմային վիճակում, իսկ MeC -ն՝ ծածկույթ առաջացնող մետաղի կարբիդը:

Օգտվելով քիմիական կինետիկայի օրենքներից [7], երկրորդ փուլի արագությունը կարելի է ներկայացնել որպես կոնցենտրացիայի անկում՝ ենթադրելով, որ տեղի է ունենում պարզ դիֆուզիոն նյութատեղափոխություն՝

$$V_{Me\Gamma} = K_{Me\Gamma} (P_{Me\Gamma} - P_{Me\Gamma}^0), \quad (5)$$

որտեղ $V_{Me\Gamma}$ -ն դեպի ալմաստի հատիկի մակերևույթ ընթացող մետաղի քլորիդի դիֆուզիայի արագությունն է, $K_{Me\Gamma}$ -ն՝ $Me\Gamma$ բաղադրիչի նյութատեղափոխության գործակիցը, $P_{Me\Gamma}$ -ն և $P_{Me\Gamma}^0$ -ն՝ $Me\Gamma$ բաղադրիչի պարզիալ ճնշումներն ալմաստի հատիկի մակերևույթի վրա, որտեղ ընթանում է ռեակցիան, համապատասխանաբար տվյալ պահին և հավասարակշռված վիճակում:

Ատոմների կամ մոլեկուլների հոսքը, որը կարող է կաշել թաղանթին, որոշվել է համաձայն Հերց-Կնուդսեն-Լենգմյուրիի տեսության՝ [8] հետևյալ բանաձևով.

$$I = \frac{\alpha (P_{Me\Gamma} - P_{Me\Gamma}^0)}{\sqrt{2\pi MRT}}. \quad (6)$$

Քանի որ ոչ բոլոր ադսորբված մոլեկուլներն են կաշում մակերևույթին, այդ պատճառով էլ α -ի մեծությունը փոփոխվում է $0 < \alpha < 1$ տիրույթում: Չադսորբված մասնիկները ենթարկվում են դեսորբման հետևյալ ռեակցիայով (երրորդ փուլ).



(2) և (7) բանաձևերից հետևում է, որ չորրորդ փուլի գործնթացը ընթանում փոխանակման հիմքի վրա: Ընդ որում, (2) ուղիղ և (7) հակադարձ ռեակցիաները $Me\Gamma$ և $H\Gamma$ բաղադրիչների նկատմամբ առաջին կարգի են: Ռեակցիայի գումարային արագությունը կլինի՝

$$V_S = K_1 P_{Me\Gamma} - K_2 P_{H\Gamma}, \quad (8)$$

որտեղ $P_{H\Gamma}$ -ն $H\Gamma$ բաղադրիչի պարզիալ ճնշումն է ալմաստի հատիկի մակերևույթի վրա, այսինքն՝ ռեակցիայի տիրույթում, իսկ K_1 -ը և K_2 -ը՝ ուղիղ և հակադարձ ընթացող ռեակցիաների արագության հաստատուններն են:

Մետաղապատված ալմաստի հատիկի մակերևույթից ռեակցիայի հետևանքով առաջացած $H\Gamma$ արգասիքների դիֆուզիայի արագությունը, այսինքն՝ դեսորբումը (հինգերորդ փուլ) կլինի,

$$V_{H\Gamma} = K_{H\Gamma} (P_{H\Gamma} - P_{H\Gamma}^0), \quad (9)$$

որտեղ $K_{H\Gamma}$ -ն $H\Gamma$ բաղադրիչի նյութատեղափոխության գործակիցն է:

Եթե Me^* նստեցման գործընթացը ընթանում է ստացիոնար պայմաններում, ապա հետագա գործընթացների արագություն կլինի՝

$$V_{Me\Gamma} = V_S = V_{H\Gamma} = V, \quad (10)$$

որտեղ V -ն ռեակցիայի ամբողջական արագությունն է:

(5) և (9) ռեակցիաներից, հաշվի առնելով (10)-րդ ռեակցիան, գտնում ենք $P_{Me\Gamma}$ ու $P_{H\Gamma}$ -ն և տեղադրելով այդ արժեքները (8)-ում ու կատարելով համապատասխան գործողություններ՝ կստանանք.

$$V = \frac{K_1 P_{Me\Gamma}^0 - K_2 P_{H\Gamma}^0}{1 - \frac{K_1}{K_{Me\Gamma}} + \frac{K_2}{K_{H\Gamma}}}. \quad (11)$$

Ենթադրելով, որ [9]՝

$$K_{Me\Gamma} = K_{H\Gamma} = K_0, \quad (12)$$

որտեղ K_0 -ն նյութափոխության ընդհանուր գործակիցն է, (11) բանաձևը կարելի է գրել հետևյալ տեսքով՝

$$V = \frac{K_1 P_{Me\Gamma}^0 - K_2 P_{H\Gamma}^0}{1 - \frac{K_1 - K_2}{K_0}}. \quad (13)$$

Ռեակցիայի (V) արագության կախվածությունը պարզիալ ճնշումներից ($P_{Me\Gamma}^0, P_{H\Gamma}^0$) թույլ չի տալիս առանձնացնել դիֆուզիոն և կինետիկ ռեժիմները, քանի որ երկու գործընթացներն էլ $Me\Gamma$ բաղադրիչի նկատմամբ ունեն առաջին կարգ: Հայտնի է նաև [10], որ նյութատեղափոխության արագությունը ճնշման որոշակի միջակայքում համընկնում է դիֆուզիայի արագությանը:

Մետաղապատման գործընթացը կատարվում է պինդ ֆազում՝ համաձայն (4) երկմոլեկուլյար ռեակցիայի: Այս դեպքում ռեակցիայի արագությունը համեմատական է փոխազդող բաղադրիչներից մեկի կոնցենտրացիային, այսինքն՝ $Me^{\bullet}$ -ին՝

$$\frac{dC_{Me^{\bullet}}}{d\tau} = -K_{Me^{\bullet}} C_{Me^{\bullet}}, \quad (14)$$

որտեղ $C_{Me^{\bullet}}$ -ը $Me^{\bullet}$ -ի կոնցենտրացիան է, որը նվազում է (4) ռեակցիայի ժամանակ, որի պատճառով էլ (14) բանաձևում առաջանում է միևնույն նշանը, τ -ը ժամանակն է, $K_{Me^{\bullet}}$ -ը՝ ռեակցիայի արագության հաստատունը:

(14) հավասարման ինտեգրումից կստանանք՝

$$\ln C_{Me^{\bullet}} = -K_{Me^{\bullet}} t + Q_{Me^{\bullet}}, \quad (15)$$

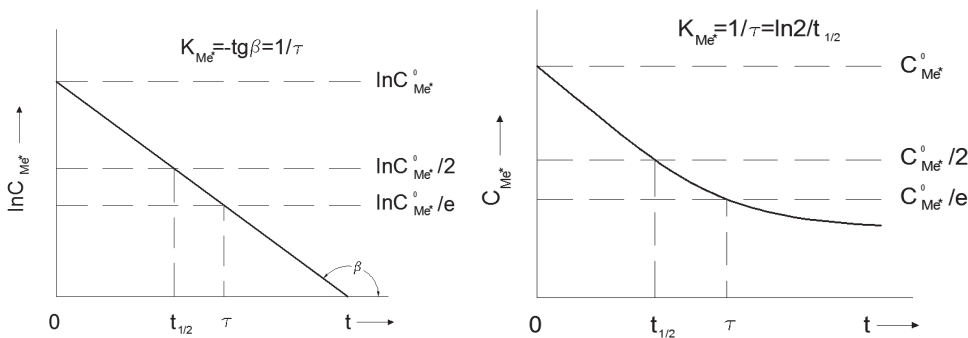
որտեղ $Q_{Me^{\bullet}}$ -ն ինտեգրման հաստատունն է, որը որոշվում է փորձի նախնական պայմաններից:

$t=0$ և $C_{Me^{\bullet}}^0$ նախնական կոնցենտրացիաների դեպքում $Q_{Me^{\bullet}} = \ln C_{Me^{\bullet}}^0$, հետևաբար, (15) բանաձիգ ստանում ենք՝

$$C_{Me*} = C_{Me*}^0 \cdot e^{-k_{Me*}t} \quad (16)$$

Նկարում ներկայացված է (16) հավասարման գրաֆիկական պատկերը, որը կարելի է օգտագործել փորձի արդյունքների մշակման ժամանակ:

Լոգարիթմական գրաֆիկից երևում է, որ $K_{Me*} = -\lg \beta$: $t_{1/2}$ ժամանակի ընթացքում կոնցենտրացիան $C_{Me*} = 1/2 C_{Me*}^0$, որտեղ $t_{1/2} = \ln 2 / K_{Me*}$, այսինքն՝ կիսատրոհված վիճակ է: Կոնցենտրացիայի փոքրացումն ընթանում է էքսպոնենցիալ օրենքով, և τ ժամանակ հետո ստանում ենք $C_{Me*} = 1/e C_{Me*}^0$, որտեղ τ -ն փոխակերպության միջին ժամանակն է, իսկ $e=2,718$: $t_{1/2}$ -ն և τ -ն ուղղակիորեն կապված են ռեակցիայի արագության հաստատունի հետ և կախված չեն (Me^* , C^*) փոխազդող նյութերի սկզբնական կոնցենտրացիաներից: Սակայն պինդ ֆազային ռեակցիաների մեխանիզմն առայժմ ամբողջությամբ ուսումնասիրված չէ, հատկապես դա վերաբերում է (4) ռեակցիային, որտեղ $[C]$ ալմաստի փոխազդեցությունը համարյա չեզոք է:



Նկ. $\ln C_{Me*} = f(t)$ կախվածության գրաֆիկն առաջին կարգի ռեակցիայի դեպքում

Դիտարկենք n բաղադրիչներից բաղկացած $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ համակարգ, որտեղ երկու ցանկացած բաղադրիչների միջև հնարավոր է, որ ընթանա առաջին կարգի ռեակցիա.

$$\begin{array}{c} K_{jm} \\ C_j \rightleftharpoons C_m: \\ K_{mj} \end{array} \quad (17)$$

Մաթեմատիկական մշակման, ինչպես նաև պարզեցման նպատակով ընդունենք, որ ռեակցիայի արագությունը համեմատական է փոխազդող նյութերից միայն մեկի կոնցենտրացիային, օրինակ, $dC_m/dt = -K_m C_m$: Այս դեպքում բաղադրիչների ռեակցիայի արագությունը որոշվում է n համակարգի հետևյալ գծային դիֆերենցիալ հավասարումով՝

$$\frac{dC_m}{dt} = \sum_{i=1}^n K_{im} C_i, \quad (18)$$

որի բնդհանուր լուծումը կլինի [7]՝

$$C_m = \sum_{j=1}^n a_{mj} e^{-\lambda_j t} + \Theta_m, \quad (19)$$

որտեղ a_{mj} , λ_j -ն հաստատուններ են և որոշվում են (18) և (19) հավասարումների արժեքից, Θ_m -ը ինտեգրման հաստատունն է, որոշվում է $C_m = C_m^0$ նախնական պայմանից, երբ $t=0$, ըստ (19) բանաձևի՝

$$\Theta m = C_m^0 - \sum_{j=1}^n a_{mj}: \quad (20)$$

(19) բանաձևի հիման վրա կարելի է գրել՝

$$C_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} e^{-\lambda_j t} + \Theta_i, \frac{dC_m}{dt} = - \sum_{i=1}^n a_{mi} \lambda_i e^{-\lambda_i t} : \quad (21)$$

(18) և (21) հավասարումներից կատանանք՝

$$\sum_{i=1}^n e^{-\lambda j t} (a_{mj} \lambda_j + \sum_{i=1}^n K_{im} a_{ij}) + \sum_{i=1}^n K_{im} \Theta_i = 0: \quad (22)$$

t -ի բոլոր արժեքների դեպքում (22) հավասարման լուծումը հնարավոր է միայն այն ժամանակ, երբ $e^{-\lambda_j t}$ -ի դեպքում գործակիցը և հավասարման վերջին անդամը հավասար են զրոյի: Հետևապես, յուրաքանչյուր m -ի համար առկա են n հավասարումներ, ինչպիսիք են՝

$$\lambda_j a_{mj} + \sum_{i=1}^n K_{im} a_{ij} = 0, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n K_{im} \Theta_i = 0: \quad (24)$$

Հավասարումների ընդհանուր թիվը կլինի $n(n+1)$, որը բավարար է գտնելու n^2 գործակիցներով a_{ij} և n էքսպոնենտ λ_j : Տրված j -ի համար, երբ $m = 1, \dots, n$ (23) հավասարումից ստացվում է n գծային հավասարումների համակարգ՝

$$\begin{cases} (K_{11} + \lambda_j)a_{1j} + K_{21}a_{2j} + \cdots + K_{n1}a_{nj} = 0, \\ K_{12}a_{1j} + (K_{22} + \lambda_j)a_{2j} + \cdots + K_{n2}a_{nj} = 0, \\ \vdots \\ K_{1n}a_{1j} + K_{2n}a_{2j} + \cdots + (K_{nn} + \lambda_j)a_{nj} = 0: \end{cases} \quad (25)$$

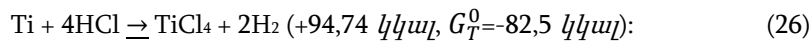
(25) դետերմինանտի լուծումը հանգեցնում է λ -ի նկատմամբ n -րդ կարգի հանրահաշվական հավասարման, որի արմատներն են՝ $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$: Օգտագործելով (20), (24) և (25) հավասարումները, գտնում ենք $a_{ij}, \dots, a_{nj}$ մեծությունները:

Ինչպես երևում է, միաբաղադրիչ համակարգում նույնիսկ առաջին կարգի պարզեցված ռեակցիաները շատ դժվար է իրականացնել փորձնականորեն, իսկ բազմաբաղադրիչ համակարգերն առավել ևս դժվար են և անկանխատեսելի:

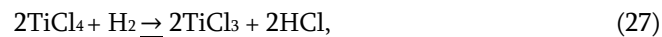
Ինչ վերաբերում է ավելի բարձր կարգի ռեակցիաներին, որոնք բնութագրական են մետաղապատման գործընթացին, ապա պետք է նշել, որ այդ ռեակ-

ցիաներն ունեն ոչ գծային դիֆերենցիալ հավասարումների տեսք, որոնց կիրառումը պրակտիկորեն հնարավոր չէ:

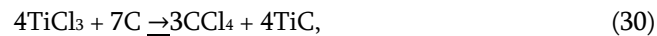
Ելանյութերի քլորացումը և ալմաստային հատիկների մետաղապատումը պայմանավորված չեն բարդություններով, և դրանք ընթանում են համաձայն (1), (2), (3) և (4) ռեակցիաների: Ալմաստային հատիկների մետաղապատումը Ti-ով մի փոքր բարդ է, չնայած Ti-ի փոխազդեցությունը HCl-ի հետ կատարվում է 300...350 °C-ում՝ ըստ հետևյալ ռեակցիայի [11]՝



Աշխատանք [12]-ում նշվում է, որ տիտանի տետրաքլորիդը (TiCl₄) 1000...1650 °C ջերմաստիճանային տիրույթում չի վերականգնվում ջրածնով մինչև մետաղական վիճակը: Գործընթացն ուղեկցվում է տիտանի երկ- և եռաքլորիդների, ինչպես նաև HCl առաջացումով՝



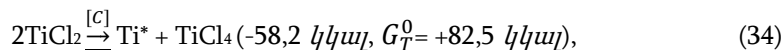
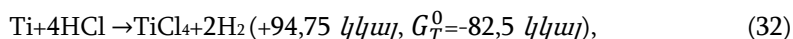
Ածխածնով տիտանի քլորիդների վերականգնման հնարավորությունը պարզելու համար, բացի փորձից, կատարվել է նաև թերմոդինամիկական հաշվարկ հետևյալ ռեակցիաների համար՝



որոնք ցույց են տալիս, որ ածխածինը չի կարող լինել վերականգնիչ:

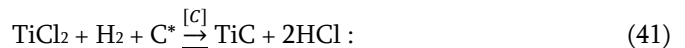
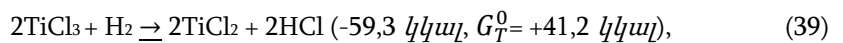
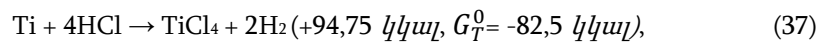
[13] աշխատանքի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ալմաստային հատիկների տիտանապատման համար կարելի է ենթադրել հետևյալ մեխանիզմը:

1. Տիտանապատում չեզոք միջավայրում, օրինակ՝ Ar-ում.



(34) ռեակցիան հայտնի է, և նրա թերմոդինամիկական պայմանները բերված են [11] աշխատանքում: Հայտնի է նաև, որ $TiCl_2$ -ը անկայուն միացություն է և կատալիզատորի մակերևույթի վրա հեշտությամբ քայքայվում է՝ առաջացնելով մետաղական Ti (T^*), որից հետո, ըստ (36) ռեակցիայի, տեղի է ունենում մետաղապատում:

2. Ջրածնի միջավայրում (H_2)՝



(38) և (41) ռեակցիաները գրեթե ուսումնասիրված չեն: Դժվարությունն այն է, որ H_2 -ը շատ լավ լուծվում է Ti -ի մեջ [14]:

Ջրածինը ցածրացնում է Ti պոլիմորֆ փոխակերպության ջերմաստիճանը $882,5^\circ C$ -ից մինչև $319^\circ C$, որից հետո սկսում է նեղանալ α ֆազի տիրույթը, այսինքն՝ ջրածնի լուծվելիությունը α - Ti -ում ձգտում է զրոյի (H -ի առավելագույն լուծվելիությունը α - Ti -ում հասնում է $6,7$ *ատոմ. %* $319^\circ C$ -ում), և մեծանում է β ֆազի տիրույթը (H -ի առավելագույն լուծվելիությունը β - Ti -ում հասնում է $40,0$ *ատոմ. %* $319^\circ C$ -ում): $319^\circ C$ -ից ցածր ջերմաստիճաններում տեղի է ունենում β ֆազի եվտեկտոիդային փոխակերպություն α և γ ֆազերի (Ti և TiH -ի պինդ լուծույթի): Ti -ի և H_2 -ի փոխազդեցության արգասիքը ոչ միայն տիտանի մոնոհիդրիդն է (TiH), այլ նաև տիտանի երկհիդրիդը (TiH_2), որը պարունակում է $66,7$ *ատոմ. %* H_2 :

$500^\circ C$ -ում ջրածնի դիֆուզիայի գործակիցը α - Ti -ում հավասար է $1,5 \cdot 10^{-9}$ *մ²/վ*, որը հազար անգամ ավելի է մետաղների իրար մեջ դիֆուզիայի գործակիցից: β - Ti -ում դիֆուզիայի գործընթացները բավականին արագանում են: Սակայն H_2 -ի լուծվելիությունը Ti -ի մեջ հակադարձելի է: Օրինակ, $640^\circ C$ -ի դեպքում տեղի է ունենում ջերմային դիսոցում՝ $TiH \rightarrow Ti + H_2$: Տիտանի երկհիդրիդը ջրածնում կայուն է $400^\circ C$ -ից բարձր ջերմաստիճաններում, սակայն $800 \dots 1000^\circ C$ ջերմաստիճանային միջավայրում քայքայվում է:

Եթե ալմաստային հատիկների տիտանապատումն իրականացվի ջրածնի միջավայրում, ապա այդ ամենը պետք է հաշվի առնվի:

Ինչպես ցույց են տալիս թերմոդինամիկական հաշվարկները, որոնք կատարվել են

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 \quad (42)$$

հայտնի բանաձևով, Ti քլորացման ռեակցիաները և ջրածնի, և արգոնի միջավայրում ունեն զրոյից ցածր ΔG_T^0 : Ջերմաստիճանի բարձրացումից տեղի է ունենում ΔG_T^0 – ի փոքրացում, հետևապես՝ բոլոր ռեակցիաներն ընթանում են, իսկ նյութափոխանակության գործընթացն իրական է:

Եզրակացություն. Կատարվել է հալոգենային միջավայրում ալմաստային հատիկների մետաղապատման ժամանակ տեղի ունեցող նյութատեղափոխության ռեակցիաների տեսական վերլուծություն, որից ելնելով՝ գործընթացի փուլայնությունը ներկայացվել է առաջին կարգի ռեակցիաներով, համաձայն որոնց՝ մետաղապատումն իրականացվում է միակողմանի նյութատեղափոխությամբ:

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

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ ՑԱՆԿ

1. **Оганян А.П.** Разработка технологии металлизации алмазных порошков термодиффузионным насыщением: Автореф. дис. ...канд. техн. наук.- Л., 1986.-16 с.
2. **Казарян А.Н.** Технология нанесения металлических покрытий на алмазные порошки методом газотранспортных реакций: Автореф. дис. ...канд. техн. наук.- Ереван, 1990.-17 с.
3. **Агбалин А.С.** Разработка металлоалмазных композиционных материалов и получение их горячей экструзией: Автореф. дис. ...канд. техн. наук.- Ереван, 2001.- 22 с.
4. МПК В24D3/06. Металлизированное алмазное зерно и способ изготовления металлизированного зерна / **В.П. Кузьмин, Г.К. Монсеев, А.И. Красовский, С.К. Мамонов, В.В. Швайков.**- 2003.
5. Исследование влияния физико-механических характеристик алмазных зерен с металлизированным покрытием на износостойкость шлифовальных кругов / **В.И. Лавриненко, Г.Д. Ильницкая, А.А. Девицкий, В.В. Смоквина, А.А. Пасечный, И.Н. Зайцева** // ВЕСТНИК ЖДТУ / Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины.- Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко МОН Украины.- 2015.- № 2 (73).
6. Diamond-hard alloy macrocomposite material / **Y.V. Naidich, A.A. Bugaev, A.A. Adamovskii, et al** // Development and application, Powder Metallurgy and Metal Ceramics.- March, 2008.- Vol. 47, issue 3.- P. 191–196.
7. **Benson S.** The Foundations of Chemical Kinetics.- New York, 1960.
8. **Brown M.E., Dolomere D., Galwey A.K.** Reaktion in the solid state.- London, 1980.
9. **Бадад-Захряпин А.А., Кузнецов Г.Д.** Текстурированные высокотемпературные покрытия.- М.: Атомиздат, 1980.- 176 с.

10. Шефер Г. Химические транспортные реакции.- М.: Мир, 1964.- 189 с.
11. Лучинский Г.П. Химия титана.- М.: Химия, 1971.- 471 с.
12. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия.- М.: Металлургия, 1973.- 399 с.
13. Елютин В.П., Пенекин Г.И., Лысов Б.С. Исследование процесса образования карбида титана // Изв. Вузов. Черная металлургия.- 1964.- N 3.- С.124-126.
14. Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев. Б.А. Водород в титане.- М.: Металлургиздат, 1962.- 224 с.

Հայաստանի ազգային պրիտեխնիկական համալսարն: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 30.08.2017:

С.Г. АГБАЛЯН, А.С. АГБАЛЯН, Н.А. ОРДЯН, Х.В. ПОГОСЯН

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН В ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Показано, что в однокомпонентных системах первого порядка простые реакции сложно выполнить экспериментальным путем, а в многокомпонентных системах - наиболее сложно и непредсказуемо. Реакции более высокого порядка, характерные для процесса металлизации, имеют вид нелинейных дифференциальных уравнений, применение которых практически невозможно.

Произведен аналитический анализ реакций материалоперемещения в процессе металлизации алмазных зерен в галогенной среде. В результате этапы процесса представлены реакциями первого порядка, согласно чему реакции производятся односторонним материалоперемещением.

Ключевые слова: алмазное зерно, галогенная среда, адсорбция, диффузия, десорбция, материалоперемещение, металлизация, связка, инструмент, прочность, износостойкость.

S.G. AGHBALYAN, A.S. AGHBALYAN, N.A. ORDYAN, KH.V. POGHOSSYAN

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METALLIZATION PROCESS OF DIAMOND PARTICLES IN A HALOGEN-CONTAINING ENVIRONMENT

It is shown that in single-component systems, even first-class simple reactions are very difficult to carry out experimentally, and multicomponent systems are more complex and unpredictable. The higher-order reactions that are characteristic of the metallization process have the form of non-linear differential equations the application of which is practically impossible.

An analytical analysis of the process of metalization of diamond grains in the halogen environment of the reaction of the material displacement is carried out. As a result of the process, the stages are represented by first-order reactions, according to which the reactions are carried out by unilateral metal variables.

Keywords: diamond grain, halogen environment, adsorption, diffusion, desorption, material displacement, metallization, ligaments, tool, durability, wear resistance.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Է.Գ. ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ, Լ.Զ. ԳԱԼՍՏՅԱՆ

ԵՐԿԱԹ-ՔՐՈՄ ՀԻՄՔՈՎ ԱՍՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔԻ
ՇՓԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Մշակվել է Fe-Cr հիմքով հակաշփական նշանակությամբ փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիա: Հիմքում ունենալով ամրացման պինդլուծությային Fe[Ni], Fe[Mo], Fe[Cr] մեխանիզմը և Fe-Cr մայրակին ավելացնելով պինդ քսանյութեր (C, MoS₂), ինչպես նաև պողպատ 40 մակնիշի մետաղալարեր, ստացվում են չոր շփման պայմաններում աշխատող հակաշփական հատկություններով ($\mu=0,050$ և $I=0,033$ *գ/կմ*) ամրանալորված փոշեկոմպոզիտային նյութեր: Ցույց են տրված դրանց մեխանիկական և շփական հատկությունները, ինչպես նաև կատարվել է կոմպոզիցիոն նյութի միկրոկառուցվածքի ուսումնասիրություն: AutoCAD 2010 միջավայրում եռաչափ գրաֆիկական մոդելի միջոցով որոշվել են աշխատանքային պայմանների համար պարամետրերի օպտիմալ տարբերակները: Մոդելային և բնօրինակային փորձարկումների արդյունքների առավելագույն տարամիտությունը չի գերազանցում 14%:

Առանցքային բառեր. արտամղում, կոմպոզիտային նյութ, մեխանիկական և հակաշփական հատկություններ, միկրոկառուցվածքային վերլուծություն:

Ներածություն. Փոշեմետալուրգիայի մեթոդները հնարավորություն են տալիս ստանալու բարձրարդյունավետ հակաշփական հատկություններով կոմպոզիտային նյութեր: Դրանք թույլ են տալիս առավել տարբերացված կառավարելու հակաշփական հատկությունները, միավորելով մեկ նյութի մեջ անհրաժեշտ ամրությամբ և պլաստիկությամբ օժտված 6 տարբեր բնույթի ներմուծանքներով լեգիրված տանող մայրակ: Ներմուծանքների մի մասը կատարում է պինդ քսանյութի դեր, իսկ մյուս մասը ակտիվացնում է կառուցվածքագոյացումը, առաջացնելով շփվող շերտերում II-ային կառուցվածքներ: Այդ ներմուծանքները (գրաֆիտ, սուլֆիդներ, ծծումբ և այլն) թույլ են տալիս հաղթահարել մակերևութային կառուցումը՝ տալով նյութին արդյունավետ հակաշփական հատկություններ:

Փոշեհամաձուլվածքում լեգիրող տարրերը (Mo, Cr, Ni, Cu և այլն) երկաթի հետ առաջացնում են պինդ լուծույթներ, իսկ ավելի մեծ պարունակությունների դեպքում՝ ինտերմետաղական միացություններ (ամրացնելով մետաղական մայրակը), որոնց առկայությունը զգալիորեն լավացնում է հակաշփական կոմպոզիտային նյութի մաշակայունությունը, հատկապես ծանր բեռնվածության պայմաններում (ինչպես ինքնայուղման, այնպես էլ շփման սահմանային յուղման ռեժիմներում):

Նշված տարրերի ազդեցությունն արտահայտվում է ոչ միայն կառուցվածքի կայունացման, այլև ջերմային մշակման նկատմամբ ունեցած հակման և մաշման ու շփման գործակցի իջեցման բնութագրերում:

Հակաշփական նշանակությամբ փոշեկոմպոզիտային նյութի ստացման տեխնոլոգիական գործընթացը բաղկացած է բովախառնուրդի պատրաստումից, մամլումից (նախնական ծակոտկենությունը՝ $\theta_0 = 20...25\%$), եռակալումից՝ մաքրակի նյութի լրիվ կամ մասնակի հոմոգենացմամբ և տաք արտամղումից՝ մինչև անծակոտկեն կառուցվածքի ստացումը:

Բովախառնուրդում վերոհիշյալ լեգիրող տարրերի %-ային պարունակությունները բերված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Փոշեկոմպոզիտային նյութերի ելքային բաղադրությունները

Համաձուլվածքի բաղադրությունը	Կոմպոնենտների բաղադրությունը, %				
N	Cr	Mo	C	Ni	Fe
1. П40Х	1,0	-	0,4	-	մնացածը
2. П40ХН	0,6	-	0,4	1,5	— " —
3. П35ХМ	1,0	0,5	0,35	-	— " —
4. П40ХНМ	1,0	0,5	0,4	1,5	— " —
5. ПНМ	-	0,5	1	1,5	— " —

Հետազոտության արդյունքները: Վերոհիշյալ տարրերի ազդեցությունը երևում է համաձուլվածքի թրծումից հետո կառուցվածքի կայունացմամբ (մանրահատ և հոմոգեն կառուցվածք): Համեմատելով եռակալված և արտամղված նմուշների միկրոկառուցվածքները՝ երևում է, որ երբ ձևագոյացումը սկսվում է եռակալման ժամանակ, ապա արտամղման ընթացքում էական փոփոխություններ կառուցվածքում չեն հայտնաբերվում: Դա հատկապես վերաբերում է Cr-ի, Mo-ի մասնիկների դիսպերսայնությանը:

Մեր կողմից մշակված տաք արտամղման տեխնոլոգիական գործընթացով ստացվել են Fe-Cr-Ni-Mo-C համակարգի համաձուլվածքներ՝ դեֆորմացման բարձր աստիճանով և մեխանիկական հատկություններով (աղ. 2):

Աղ. 2-ում ներկայացված են հետազոտված կոնստրուկցիոն պողպատների մեխանիկական հատկությունները նորմալացումից հետո:

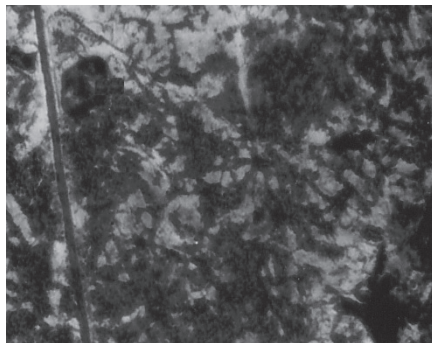
Տաք արտամղումից և նորմալացումից հետո անծակոտկեն 3-րդ համաձուլվածքի (աղ. 2) մեխանիկական հատկություններն են՝ $\sigma_s = 500...550$ ՄՊա, $\delta = 13...18\%$, $HB = 1250$ ՄՊա: Նկ.1-ում բերված է Fe-Cr-Mo-C կոմպոզիտային նյութի միկրոկառուցվածքը արտամղումից հետո: Գրաֆիտի առկայությունը կոմպոզիտային նյութի

բաղադրությունում կատարում է 2 գործողություն՝ I – որպես պինդ քսանյութ, II – լեգիրող տարր, քանի որ ակտիվորեն մասնակցում է կառուցվածքագոյացմանը՝ լուծվելով երկաթում և առաջացնելով α պինդ լուծույթ: Միկրոկառուցվածքը ֆերիտ-պեռլիտ է՝ լեգիված քրոմով: Հետազոտություններից պարզվել է նաև, որ մոլիբդենի առկայության պայմաններում, բացի երկաթի և քրոմի կարբիդներից, կարող են գոյանալ նաև MoC, Mo₂C:

Աղյուսակ 2

Լեգիրված կոմպոզիտային փոշեհամաձուլվածքների մեխանիկական հատկությունները

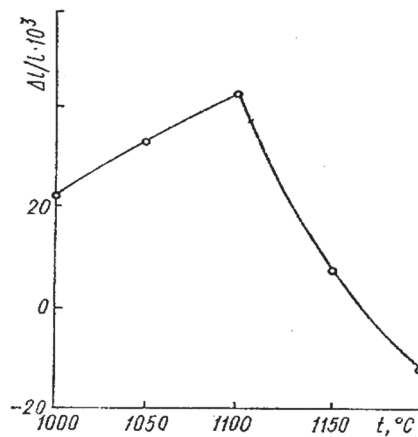
Փոշեհամաձուլվածքներ	σ_b , ՄՆ/սմ ²	σ_s , ՄՆ/սմ ²	δ , %	ψ , %	KCU, կՋ/սմ ²	HB, ՄՊա	Ջերմային մշակում
1. П40Х (տաք մամլված, $\theta=3...4\%$)	534	741	8	38	500	1100...1150	նորմալացում
2. П40Х (տաք արտամղված, $\theta=0$)	568	833	14	45	590	1100...1150	— " —
3. П38ХМ (տաք արտամղված, $\theta=0$)	550	857	13	46	613	1250...1300	— " —
4. П40ХН (տաք մամլված, $\theta=3...4\%$)	587	782	9	40	580	1250...1300	— " —
5. П40ХМА (տաք արտամղված $\theta=0$)	—	1230	12	33	617	3300...3400	$T_{\text{մխ}}=850^\circ\text{C}$ արտամղումից հետո (ԲՋՄՄ), $T_{\text{արձ.}}=400^\circ\text{C}$, սառեցումը յուղում



*Նկ. 1. Fe-Cr-Mo-C կոմպոզիտային նյութի միկրոկառուցվածքը արտամղումից հետո
($T_w=1100^\circ\text{C}$, $\lambda=4$)($\times 400$)*

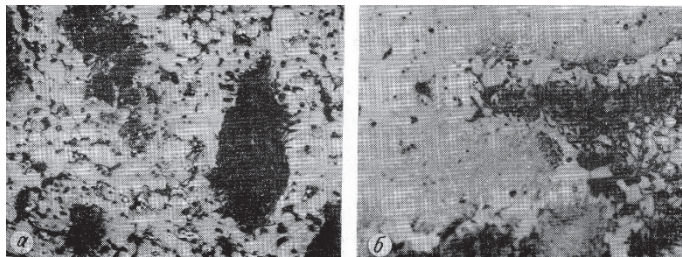
Fe-Mo-C խառնուրդին Ni-ի ավելացումը (բաղադրություն 5), Fe-Mo-Ni եռակի համակարգի հավասարակշռության պայմանի համաձայն, ածխածնի 2,14% և ավելի պարունակությունների դեպքում խիստ ակտիվացնում է եռակալման գործընթացը՝ հեղուկ ֆազի առկայության պատճառով, արդյունքում՝ մեծանում

են գծային նստեցման չափսերը (նկ. 2): Ni-ի առկայության դեպքում լեգիրված Fe-C-ում գոյանում են երկակի և եռակի պինդ լուծույթներ: Ջերմաստիճանի բարձրացումով ($T=1200^{\circ}\text{C}$) և պահումով, $\tau_{\text{պահ}}=3$ ժամ, կատարվում է համաձուլվածքի հոմոգենացում: Եռակալուծից հետո ստացվում է հետերոգեն կառուցվածք, որը բաղկացած է երկաթի հիմքով պինդ լուծույթներից՝ [FeNi], [NiMo] և [FeNiMo], և դիսպերս կարբիդներից [1]:



Նկ. 2. Fe-Ni-Mo-C կոմպոզիտային նյութի գծային նստեցման կախումը եռակալման ջերմաստիճանից

Միկրոկառուցվածքային վերլուծությունով որոշվել են <Fe-Ni-Mo-C> համաձուլվածքի ֆազային բաղադրությունները՝ Ni և Mo-ի ոչ համասեռ պինդ լուծույթը երկաթում, առկա են նաև քիչ կարբիդային ֆազեր (նկ. 3 ա, բ):



ա)

բ)

Նկ. 3. Բարձր լեգիրացված Fe-Ni-Mo-C փոշեհամաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը. ա – խոշորացում ($\times 450$); բ – ($\times 600$)

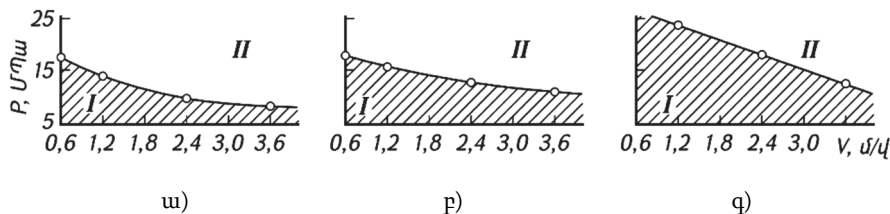
Աղ. 2-ի արդյունքները ցույց են տալիս, որ մեխանիկական բարձր հատկություններն ի հայտ են գալիս տաք արտամղմամբ ստացված П40ХНМ մակնիշի փոխհամաձուլվածքում, միտումից ($T_{\text{մի}}=850^{\circ}\text{C}$, սառեցումը յուրում) և $T_{\text{արձ}}=400^{\circ}\text{C}$ -ում

արձակումից հետո: Ստացվել է $\sigma_{\sigma}=1230 \text{ ՄՆ/սմ}^2$, $\varphi=33\%$, իսկ բարձր ջերմամեխանիկական մշակումից հետո՝ $\sigma_{\sigma}=1800 \text{ ՄՆ/սմ}^2$, $\varphi=35\%$:

Ընտրված լեգիրող տարրերի՝ երկաթի հետ առաջացրած պինդ լուծույթներն ամրացնում են մետաղական հիմքը և լավացնում կոմպոզիտային նյութի մաշակայունությունը, հատկապես աշխատանքի ծանր պայմաններում (ինչպես ինքնալուրման ռեժիմներում, այնպես էլ սահմանային շփման պայմաններում):

Հետազոտությունների արդյունքում նկատվում են կառուցվածքի կայունացում, թրծման նկատմամբ բարձր ունակություն, կայունություն մաշման նկատմամբ և շփման ցածր գործակցի ապահովում (նկ. 3 ա, բ):

Նկ. 4-ում բերված է ստացված և ավանդական փոշեպողպատների Cr-ի (40X) և Ni-ի ու Mo-ի (40XHM) մաշակայունության կախվածությունը նորմալ ճնշումից (P) և սահքի արագությունից (V):



Նկ. 4. Նորմալ (I) և խաթարված (II) աշխատանքային տիրույթների դիագրամը. պողպատ 40 (ա), 40X (բ) և 40XHM (գ), կախված ճնշումից (P) և սահքի արագությունից (V)

Փորձարկման է ենթարկվել նաև տաք արտամղման եղանակով ստացված $\text{Fe}+1\%\text{Cr}+1,5\%\text{Ni}+1,0\%\text{C}+3\%\text{Cu}+3\%\text{MoS}_2+25\%$ պողպատ 40 մակնիշի լարեր* փոշեկոմպոզիտային նյութը:

Մետաղալարերով ամրանավորված կոմպոզիտային նյութ ստանալու համար մեր կողմից մշակվել է տեխնոլոգիա, որը ներառում է մամլման և տաք արտամղման գործընթացները [2]: Տեխնոլոգիական գործընթացի էությունը հետևյալն է: Պողպատ 40-ի լարը կտրել ենք $l/d=20$ ($d=0,28 \text{ մմ}$). 1-ն լարի երկարությունն է, d -ն՝ տրամագիծը: Այնուհետև կտրատված լարերը յուղազրկել ենք, մաքրել, որից հետո թրծել ($t_{\text{թրծ}}=850\ldots900^\circ\text{C}$, $\tau=1,0\ldots1,5 \text{ ժ}$): Հավասարաչափ բովախառնուրդ ստանալու համար բաղադրիչները (փոշենյութ, մետաղալարեր) թրջել ենք սպիրտով (1%) և խառնել 9...10 ժ: Կտրատված լարերը բովախառնուրդ ենք ներմուծել բաժին առ բաժին: Մետաղալարի քանակը կոմպոզիտային նյութում որոշվել է $G_L=G_{\text{մ}}V_L/V_{\text{մ}}V_{\text{մ}}$ բանաձևով, որտեղ G_L , $G_{\text{մ}}$ - լարի և մայրակի զանգվածներն են, իսկ V_L , $V_{\text{մ}}$ - լարի և մայրակի գրաված ծավալները կոմպոզիտային նյութում:

$V_L/V_{\text{մ}}$ - հարաբերությունը հաշվարկային է, բովախառնուրդի զանգվածը որոշվել է V_L և $V_{\text{մ}}$ գումարային արժեքով: Բովախառնուրդի երկկողմանի մամլումով պատրաստել ենք 20 % նախնական ծակոտկենությամբ փորձանմուշներ 25 մմ

տրամաչափով ($H_0/D_0=1,5$), որոնք ենթարկվել ենք նախատաքացման $1150^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ պաշտպանիչ միջավայրում (ջրածին) $0,5$ ժ պահման տևողությամբ: Տաք վիճակում փորձանմուշները ենթարկվել են արտամղման՝ $\lambda=4$ արտամղման գործակցով: Ստացված կոմպոզիտային նյութերը նորմալացումից հետո ըստ հակաշփական հատկությունների փորձարկվել են CMI-2 սարքի վրա՝ պտտման արագությունը 1 մ/վ, արագության և $2,0...40$ ՄՊա բեռնվածության պայմաններում [3, 4]:

Հետազոտվել է նաև մասշտաբային գործոնի ազդեցությունը եռակալված նյութերի հակաշփական հատկությունների վրա: Սակայն ամրանավորված մետաղակերամիկական նյութերի՝ ըստ մասշտաբային գործոնի շփական և մաշվածքային բնութագրերի հետազոտում գործնականում չի կատարվել: Այս առումով մեր կողմից մշակվել է փորձարկումների մեթոդ, և իրականացվել են շփման ու մաշման գործընթացի մոդելավորման համալիր հետազոտություններ չոր շփման պայմաններում աշխատող (առանցքակալներ և սահքի հենարաններ) արտամղված հակաշփական նյութերի համար (ըստ նկ. 4-ի):

Շփման և մաշման մոդելավորման խնդիրներում մոդելայինից իրականի անցման մասշտաբային գործակիցները հաշվարկվում են հայտնի C պարամետրի նկատմամբ (երկրաչափական պարամետրերի համալիր), որում միավորվում են մոդելի և բնօրինակի միկրոերկրաչափական պարամետրերը [5]:

Հաշվարկային չափանիշներով և մասշտաբային գործոնով պարզվել է, որ սահքի արագությունը (V) և տեսակարար ճնշումը (P) մոդելի և իրական առանցքակալի կոնտակտում պետք է լինեն միանման, այսինքն՝ $PV=1$: Դա թույլ է տալիս հաստատել, որ ստացված բանաձևերը հնարավորություն են տալիս կիրառելու նախկինում մշակված շահագործողական հատկությունների հավասարության դասական սկզբունքները մոդելի և բնօրինակի վրա: Մշակվել և փորձարկվել է արտամղված փոշեկոմպոզիցիաների շփման ժամանակ մաշման մոդելավորման մեթոդիկան, հաշվի առնելով հաշվարկի մասշտաբային գործոնը: Այդ մեթոդիկայով կատարված հետազոտությունները թույլ են տալիս առավել մեծ ճշգրտությամբ գնահատել շփման բնութագրերը և հուսալիորեն կանխորոշել մեքենաների և մեխանիզմների շփման հանգույցների երկարակեցությունը:

Ունենալով Կունսի մակերևույթի գրաֆիկական մոդելը՝ ցանցի ցանկացած հանգուցային կետում (a , b , c) կարելի է որոշել այդ կետի x , y , z կոորդինատները թվային արժեքները, այսինքն՝ մակերևույթի այդ կետերին համապատասխանող փորձարկվող նմուշի բեռնվածությունը (P), պտտման արագությունը (V) և շփման գործակիցը՝ (μ) աղ. 3, 4, նկ. 5, 6:

Աղյուսակ 3

Հաստատուն բեռնվածության դեպքում ($P=23$ ՄՊա) տարբեր արագություններին համապատասխան շփման գործակցի արժեքները՝ նշված կետերում

Կետերը	1	2	3	4	5	6	7
P, ՄՊա	23	23	23	23	23	23	23
V, մ/վ	3,6	3,1	2,6	2,1	1,6	1,1	0,6
$\mu \cdot 10^{-2}$	7,5	6,0	5,3	4,7	4,3	4,2	4,2

Աղյուսակ 4

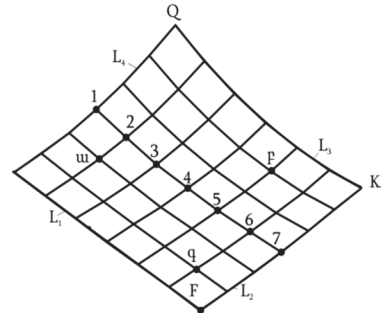
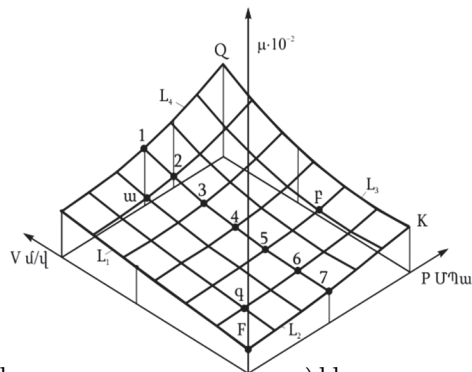
Հաստատուն բեռնվածության դեպքում ($P=23$ ՄՊա) տարբեր արագություններին համապատասխան մաշման գործակցի արժեքները՝ նշված կետերում

Կետերը	1	2	3	4	5	6	7
P, ՄՊա	23	23	23	23	23	23	23
V, մ/վ	3,6	3,1	2,6	2,1	1,6	1,1	0,6
$I \cdot 10^{-2}$	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,0	2,9

Բազմակոմպոնենտ ամրանավորված կոմպոզիտային նյութի աշխատանքային օպտիմալ ռեժիմը գտնվում է ճնշման արժեքների $P=12...40$ ՄՊա միջակայքում, որի ընթացքում շփման գործակցի և մաշման արժեքները չեն գերազանցում $\mu=0,050$ և $I=0,033$ $գ/կմ^3$ [3, 4]:

Cu-ով և C-ով լրացուցիչ լեգիրումը, ինչպես նաև հետագա նորմալացումն ապահովում են հակաշփական բարձր հատկություններ: Դա ապացուցում է նաև մետաղագրական վերլուծությունը (նկ. 7): Նորմալացումից հետո ($t_{մի}=850^{\circ}\text{C}$) կառուցվածքը ֆերիտ-պերլիտային է, ինչն էլ ապահովում է կոմպոզիտային նյութի մեխանիկական բարձր հատկությունները ($\sigma_{\partial}=500...550$ ՄՆ/մ², HB=1300 ՄՊա, $\delta=13\%$, $\psi=35\%$, KCU=590 $կՋ/մ^2$):

3 կշ.% Cu-ի առկայությունը փոշեկոմպոզիտային նյութում ապահովում է նաև բարձր ջերմահաղորդականություն, ինչն անհրաժեշտ է հակաշփական հատկությունների բարձագման համար: Փոշեկոմպոզիտային նյութի մեխանիկական և հակաշփական հատկությունները պայմանավորված են կոմպոնենտների տոկոսային պարունակությամբ (Fe, Cr, Cu, Ni, MoS₂, C), որոնց քանակական արժեքների օպտիմալացումը կատարվել է մեր կողմից ստացված փոշեհամաձուլվածքի նկատմամբ՝ Fe+1%Cr+1,5%Ni+1,0%C+3%Cu+3%MoS₂+25% պողպատ 40* [5,6]:



ա) կետ

$$x_w = 18,9$$

$$P_w = 18,9 \text{ ՄՊա}$$

$$y_w = 3,1$$

$$V_w = 3,1 \text{ մ/լ}$$

$$z_w = 5,8$$

$$\mu_w = 5,8 \cdot 10^{-2}$$

բ) կետ

$$x_p = 31,7$$

$$P_p = 31,7 \text{ ՄՊա}$$

$$y_p = 1,6$$

$$V_p = 1,6 \text{ մ/լ}$$

$$z_p = 5,1$$

$$\mu_p = 5,1 \cdot 10^{-2}$$

գ) կետ

$$x_q = 14,4$$

$$P_q = 14,4 \text{ ՄՊա}$$

$$y_q = 1,1$$

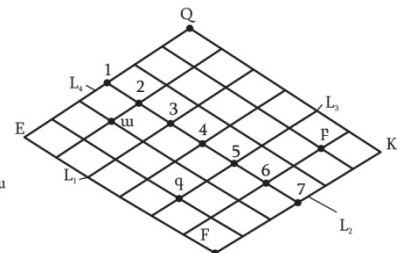
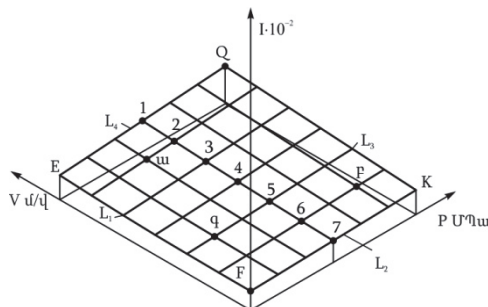
$$V_q = 1,1 \text{ մ/լ}$$

$$z_q = 3,8$$

$$\mu_q = 3,8 \cdot 10^{-2}$$

Նկ. 5. Շփման գործակցի կախվածությունը բեռնվածությունից.

$Fe+1\%Cr+1,5\%Ni+3\%Cu+1\%C+3\%MoS_2+25\%$ պողպատ 40^* բաղադրությամբ ամրանավորված անձակոտկեն նմուշի դեպքում AutoCad ծրագրով Կունսի մակերևույթի տարածական գրաֆիկական մոդելի վրա



ա) կետ

$$x_w = 18,7$$

$$P_w = 18,7 \text{ ՄՊա}$$

$$y_w = 3,1$$

$$V_w = 3,1 \text{ մ/լ}$$

$$z_w = 3,6$$

$$I_w = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

բ) կետ

$$x_p = 31,7$$

$$P_p = 31,7 \text{ ՄՊա}$$

$$y_p = 1,1$$

$$V_p = 1,1 \text{ մ/լ}$$

$$z_p = 3,4$$

$$I_p = 3,4 \cdot 10^{-2}$$

գ) կետ

$$x_q = 14,3$$

$$P_q = 14,3 \text{ ՄՊա}$$

$$y_q = 1,6$$

$$V_q = 1,6 \text{ մ/լ}$$

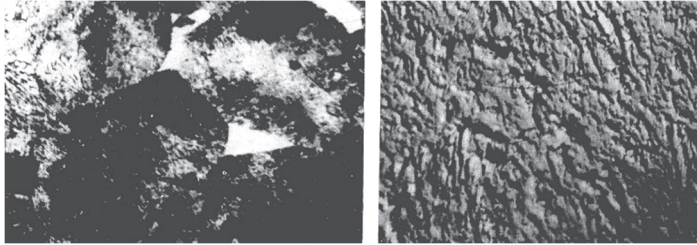
$$z_q = 2,8$$

$$I_q = 2,8 \cdot 10^{-2}$$

Նկ. 6. Շփման գործակցի կախվածությունը բեռնվածությունից.

$Fe+1\%Cr+1,5\%Ni+3\%Cu+1\%C+3\%MoS_2+25\%$ պողպատ 40^* բաղադրությամբ ամրանավորված անձակոտկեն նմուշի դեպքում AutoCad ծրագրով Կունսի մակերևույթի տարածական գրաֆիկական մոդելի վրա

* պողպատ 40 - ամրանավորող ֆազ



ա)

բ)

Նկ .7. Fe-Cr-Cu-C ($C=0,5\%$) բաղադրությամբ արտանդված նյութի միկրոկառուցվածքը.
($t_{արտ}=1100^{\circ}C$; $\lambda=4$). (ա - $x 500$); (բ - $x 12000$)

Եզրակացություն. Cr, Mo, Ni միաժամանակ լեգիրումը ոչ միայն բարձրացնում է կոմպոզիտային նյութի մեխանիկական հատկությունները, այլև նկատվում է նորմալ մաշման տիրույթի կտրուկ ընդարձակում: Այս տվյալները հաստատում են Cr, Mo-ի դրական ազդեցությունը պողպատների հակաշփական հատկությունների, հատկապես մաշման վրա, հետևաբար՝ դրանք կարելի է երաշխավորել որպես լեգիրող տարր երկաթի հիմքով հակաշփական հատկություններով օժտված կոմպոզիտային նյութերի ստացման համար: Ունենալով AutoCad-2010 միջավայրում եռաչափ գրաֆիկական մոդելը՝ որոշվել են ամրանավորված նյութի աշխատանքային պայմաններում շփման պարամետրերի օպտիմալ տարբերակները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Радомысельский И.Д.** Металлокерамические конструкционные детали // Порошковая металлургия.-Киев, 2002.-N 9/10. - С. 105-117.
2. Разработка технологии получения композиционных материалов на основе Fe-Mo-Cu/ **Ш.Э. Саркисян, А.С. Петросян, Э.Г. Амбарцумян и др.** // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2004. -Т. 57, N5.-С. 393-399.
3. **Պետրոսյան Հ.Ս., Թումանյան Գ.Հ., Համբարձումյան Է.Գ.** Ֆերոմոլիբդենի հիմքով ստացված փոշեկոմպոզիցիոն նյութերի հակաշփական հատկությունները և կառուցվածքային վերլուծությունը // ՀԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ սերիա. - 2006.-Հ.59, N1. - էջ 53-60:
4. Металлокерамические износостойчивые конструкционные материалы на основе Fe-Cr/ **А.С. Петросян, А.С. Симонян и др.** //Материалы 11-й Международной технической конференции. – Т.1. –СПб., 2009.- С. 43-48.
5. **Սողոմոնյան Վ.Հ.** Գրաֆիկական մոդելավորում AutoCad 2002 միջավայրում: Ուսումնական ձեռնարկ.- Երևան; ՀՊՃՀ, 2002.- 91 էջ:
6. Структурообразование и механические свойства многокомпонентных порошковых композиционных материалов на основе Fe-Cr/ **А.С. Петросян, Ж.К. Гукасян и др.** // Научные труды ЗАО “Лернаметаллургии институт”. - Ереван, 2006-2007.- С.125-129.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 18.01.2018:

А.С. ПЕТРОСЯН, Э.Г. АМБАРЦУМЯН, Л.З. ГАЛСТЯН
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АРМИРОВАННЫХ
ПОРШКОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРОХРОМА

Разработана технология получения порошковых композиционных материалов на основе матрицы Fe-Cr антифрикционного назначения. На основе растворного Fe[Ni], Fe[Mo] механизма путем добавления металлических дискретных проволок марки Сталь 40 и твердых смазок (C, MoS₂) получены порошковые композиционные армированные материалы антифрикционного назначения ($\mu=0,030$, $I=0,033$ з/км), работающие в условиях сухого трения. Показаны механические и триботехнические свойства и дан микроструктурный анализ композиционных антифрикционных материалов. В среде AutoCAD 2010 с помощью трехмерной модели определены оптимальные параметры для рабочих условий. Максимальный диапазон моделей и исходных результатов испытаний не превышает 14%.

Ключевые слова: экструзия, композиционный материал, механические и антифрикционные свойства, микроструктурный анализ.

H.S. PETROSYAN, E.G. AMBARZUMYAN, L.Z. GALSTYAN
INVESTIGATING THE WEAR RESISTANCE OF POWDER ALLOYS BASED ON
FERRO-CHROME

A technology for obtaining powder composite materials based on the antifriction-purpose matrix Fe-Cr is developed. Based on the solution Fe[Ni], Fe[Mo] mechanism, by adding metallic discrete wires of the steel type 40 and solid lubricants (C, MoS₂), anifriction-purpose powder composite materials ($\mu=0,030$ l $I=0,033$ gr/km), operating in dry friction conditions are obtained. Mechanical, tribotechnical propperties and microostructural analysis of composite antifriction materials are shown. The optimal parameters for working conditions are determined in the AutoCAD 2010 environment by means of a three-dimensional model. The maximum range of the models, and the main results of experiments are not more than 14%.

Keywords: extrusion, composite materials, mechanical and antifriction propperties, microstructure analysis.

Ս.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ,
Հ.Ս. ԱՎԱԳՅԱՆ, Վ.Հ. ՄԱՐԳՍՅԱՆ

ՄԻՋՈՒԿԱՑԻՆ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈՎՆԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ
(ՏՎՅԱԼ ԵՐԿՐԻ ՊԱՀԱՆՁՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ)

Ներկայացված է էներգետիկ ոլորտի զարգացման կանխատեսումային ծրագրերի մշակման գործընթացում, տվյալ երկրի պահանջներից և առանձնահատկություններից ելնելով, առավել ընդունելի էներգաբաղադրանքների, այդ թվում՝ միջուկայինի ընտրման մեթոդ: Վերջինիս մշակման համար օգտագործվել է մաթեմատիկական MAVT մեթոդը, որի համար հիմք է հանդիսանում մեկ ատրիբուտի ֆունկցիան:

Առանցքային բառեր. էներգետիկական տեխնոլոգիա, էներգետիկական ցուցիչ, MAVT մեթոդ, միջուկային էներգաբաղադրանք:

Գոյություն ունեցող բազմաթիվ մաթեմատիկական մեթոդները հնարավորություն են տալիս իրականացնելու տարբեր համակարգերի համեմատական գնահատում: Համակարգերի համեմատական գնահատման մեթոդներից յուրաքանչյուրն ունի և՛ առավելություններ, և՛ թերություններ: Տարբեր մեթոդների համադրական վերլուծությունը ցույց է տվել, որ որոշում կայացնելու բազմաչափանիշային մեթոդը (MCDA) ամենահարմարն է միջուկային էներգաբաղադրանքների համեմատական գնահատման համար:

Որոշումների կայացման բազմաչափանիշային մեթոդը (MCDA) ներկայացնում է խնդիրների ձևավորման տարբեր մեթոդների համախումբ, որն օգտագործվում է խնդրի առաջադրման և լուծման համար: MCDA-ն ներառում է տարբեր մոտեցումներ, որոնց թվում են MAUT/MAVT, AHP, ELECTRE, PROMETHEE և այլ մեթոդներ: Վերլուծությունը ցույց է տվել, որ MAUT/MAVT և AHP մեթոդները բավականին պարզ են, մինչդեռ ELECTRE և PROMETHEE՝ ավելի բարդ:

Բազմաչափանիշային գնահատման մեթոդներում գնահատման յուրաքանչյուր ցուցչին տրվում է թվային արժեք, որը ցույց է տալիս վերջինիս «հարաբերական» կարևորությունը և արտացոլում է տվյալ ցուցչի քաջային արժեքը: Ցուցիչների քաջային գործակիցների արժեքների գնահատումը և դրանց մեկնաբանումը ամբողջությամբ կախված է տվյալ երկրի էներգետիկ ոլորտի համար որոշում կայացնողներից: Նրանց կողմից որոշումների ընդունման համար հիմք են հանդիսանում այդ երկրի պահանջները և առանձնահատկությունները: Այդպիսի մեթոդ է MAUT/MAVT [1]:

MAUT-ը և MAVT-ը համեմատական գնահատման մեթոդներ են, որոնց օգտագործման նպատակն է չափման տարբեր միավորներ ունեցող ցուցիչները՝ տնտեսական ծախսեր, ռիսկեր, ստացվող եկամուտներ և այլն, միավորել: MAUT և MAVT մեթոդները սերտորեն կապված են միմյանց, ուստի դրանք չեն դիտարկվում որպես սկզբունքորեն տարբեր մեթոդներ: MAUT-ը ընդլայնում է MAVT մեթոդը, հաշվի առնելով հավանականությունները և սպասումները, և թույլ է տալիս առնչվել անորոշությունների հետ: MAVT մեթոդի հիմքում ընկած է մեկ ատրիբուտի ֆունկցիան:

MAVT մեթոդը կարելի է օգտագործել էներգետիկական տարբեր տեխնոլոգիաների համեմատական ընտրություն կատարելիս, երբ հայտնի են ընտրության հիմքում դրված ցուցիչների թվային արժեքները: Յուրաքանչյուր ցուցիչ ունի իր գնահատման ֆունկցիան: Այդ ֆունկցիան տարբեր ցուցիչների իրական թվային արժեքները, համաձայն տվյալ բնագավառի փորձագետների գնահատման, ձևափոխում է մեկ ընդհանուր՝ անվերջ կամ բալային ($0 \div 1$), սանդղակի, որը կոչվում է մեկ ատրիբուտի ֆունկցիա:

Ցուցիչները գնահատվում են ըստ իրենց կարևորության՝ ելնելով տվյալ երկրի պահանջներից և առանձնահատկություններից: Տվյալ երկրի համար նախընտրելի էներգաբլոկի ընտրություն կատարելիս անհրաժեշտ է յուրաքանչյուր ցուցիչի արժեքը բազմապատկել նրա համապատասխան քաշային գործակցի արժեքներով: Բազմացուցիչ գնահատման մեթոդի պարզեցված տեսքը հետևյալն է՝ $u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i)$, որտեղ $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ [2]:

Այս արտահայտության մեջ $u_i(x_i)$ - ը մեկ ատրիբուտի ֆունկցիայի արժեքն է i -րդ ցուցիչի համար, որն ընտրվում $0 \div 1$ սահմաններում: k_i - ը i -րդ ցուցիչ քաշային գործակցի արժեքն է, որը հաստատուն գործակից է և ցույց է տալիս տվյալ էներգաբլոկի ընտրության գործընթացում յուրաքանչյուր ցուցիչի ազդեցության չափը: Մեկ ատրիբուտի ֆունկցիայի արժեքի որոշման համար կարելի է օգտվել ամենատարածված և պարզագույն գծային առնչություններից: Երբ ցուցիչը պետք է ձգտի իր առավելագույն արժեքին, օգտվում ենք հետևյալ արտահայտությունից՝

$$u(x) = \frac{x - x^{min}}{x^{max} - x^{min}},$$

իսկ իր նվազագույն արժեքին ձգտելիս՝

$$u(x) = \frac{x^{max} - x}{x^{max} - x^{min}},$$

որտեղ x^{max} և x^{min} - ը ֆունկցիայի գնահատման տիրույթի առավելագույն և նվազագույն արժեքներն են [3]:

Հարկ է նշել, որ MAVT մեթոդը բավականին ճկուն է և հնարավորություն է տալիս իրականացնել տարբեր գնահատումներ:

Միջուկային էներգաբլոկների համեմատության և գնահատման համար օգտագործվել են մի շարք ցուցիչներ, այդ թվում՝ ինչպես հիմնական, այնպես էլ երկրորդական: Ցուցիչների մշակման համար հիմք են հանդիսացել Ատոմային էներգետիկայի միջազգային գործակալության (ԱԷՄԳ) INPRO նախագծի շրջանակներում միջուկային էներգաբլոկների համեմատության ոլորտներում ընդունված առանձնահատկությունները: Ելնելով Հայաստանի Հանրապետության առանձնահատկություններից, միջուկային էներգաբլոկների համեմատության համար սույն հոդվածում դիտարկվել են հետևյալ ոլորտները. Էկոնոմիկա (Economics), շրջակա միջավայրի պաշտպանություն (Environment), ռադիոակտիվ թափոնների կառավարում (Waste Management), տվյալ ժամանակում էներգաբլոկի տեխնոլոգիական հասանելիություն (Maturity of Technology), երկրի առանձնահատկություն (Country Specific) և հասարակական կարծիք տվյալ էներգաբլոկի վերաբերյալ (Public Acceptance), որոնք խմբավորվել են հետևյալ երեք հիմնական խմբերում.

- ✓ ծախսեր (Cost) - Էկոնոմիկայի ոլորտ,
- ✓ նախագծի կատարման աստիճան (Performance) - ռադիոակտիվ թափոնների կառավարման, երկրի առանձնահատկությունների և շրջակա միջավայրի պաշտպանության ոլորտներ,
- ✓ երկրի կողմից ընդունելիություն (Acceptability) - տվյալ ժամանակում էներգաբլոկի տեխնոլոգիական հասանելիությունը, տվյալ տեխնոլոգիայի վերաբերյալ ձևավորված հասարակական կարծիքը:

Սույն աշխատանքում միջուկային էներգաբլոկների՝ առաջին մոտեցմամբ ընտրման դեպքում երկրորդական ցուցիչները չեն օգտագործվել: Նշված ոլորտների համար ընտրվել են հետևյալ 11 ցուցիչները.

1. Էկոնոմիկայի ոլորտ.

✓ E.1 — ԱԷԿ-ում արտադրված էլեկտրաէներգիայի նորմավորված երկարաժամկետ միջին ինքնարժեք (Levelized Long-term average NPP production cost, LUEC),

✓ E.2 — էներգահամակարգում արտադրվող էներգիայի երկարաժամկետ միջին ինքնարժեք (Power system Long-term average generation cost),

✓ E.3 — նոր սերնդի տեխնոլոգիաների ներդրման ծախսեր (New generation investment cost),

✓ E.4 — էներգահամակարգի ընդհանուր արժեք (Whole energy system cost):

2. Ռադիոակտիվ թափոնների կառավարման ոլորտ.

✓ WM.1 — ռադիոակտիվ թափոնների կառավարում (Waste Management):

3. Երկրի առանձնահատկություններ.
 - ✓ CS.1 — էներգետիկ անկախության մակարդակ (Energy Independency Level):
4. Շրջակա միջավայրի պաշտպանություն.
 - ✓ ENV.1 — էներգահամակարգում արտադրված էլեկտրական էներգիայի քանակը՝ վերագրված ուրանի/թորիումի միավոր քանակին:
5. Տվյալ ժամանակում էներգաբլոկի տեխնոլոգիական հասանելիություն.
 - ✓ M.1 — նախագծման փուլ,
 - ✓ M.2 — տվյալ տեխնոլոգիայի հասանելիության ժամանակի պահանջ, որը ընդունելի է տվյալ երկրի համար,
 - ✓ M.3 — լիցենզավորում և ստանդարտավորում:
6. Հասարակական կարծիքը տվյալ էներգաբլոկի վերաբերյալ.
 - ✓ PA.1 — հասարակական կարծիքը միջուկային էներգիայի օգտագործման վերաբերյալ:

Սկսած 1993 թվականից առ այսօր, ՀՀ էներգետիկայի զարգացման գոյություն ունեցող բոլոր ծրագրերը մանրամասն վերլուծվել են [4] աշխատանքում: Ծրագրերի վերլուծությունը ցույց է տվել, որ ՀՀ էներգետիկայի ոլորտի զարգացման համար կարևոր նշանակություն ունի միջուկային էներգետիկայի զարգացումը: ՀՀ Նախագահի թիվ 182-Ն Կ 2013թ. հոկտեմբերի 23-ի կարգադրությամբ հաստատվել է «Հայաստանի Հանրապետության էներգետիկ անվտանգության ապահովման հայեցակարգը», և ՀՀ կառավարության թիվ 836-Ն 2014թ. հուլիսի 31-ի որոշմամբ՝ «ՀՀ էներգետիկ անվտանգության ապահովման հայեցակարգի դրույթների իրականացումն ապահովող 2014-2020 թվականների միջոցառումների ծրագիր-Ժամանակացույցը», որոնցում նախանշվել են մինչև 2025թ. այն միջոցառումները, որոնք կապահովեն պետության կարիքների բավարարման համար մատչելի գներով, որակյալ և հուսալի էներգամատակարարում ինչպես ամենօրյա պայմաններում, այնպես էլ արտակարգ և պատերազմական իրավիճակներում: Այդ փաստաթղթերում նշված միջոցառումները նպատակաուղղված են ապահովելու էներգետիկայի ոլորտի կայուն զարգացումը՝ հիմնված տնտեսության էներգաարդյունավետության բարձրացման, ատոմային էներգետիկայի զարգացման և վերականգնվող ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործման վրա: Համաձայն նշված ծրագիր-Ժամանակացույցի՝ նախատեսվում է իրականացնել միջոցառումներ՝ ուղղված էներգահամակարգում շահագործվող սարքավորումների և մեխանիզմների ֆիզիկական և բարոյական մաշվածության նվազեցմանը, Հայկական ԱԷԿ-ի գործող ատոմային էներգաբլոկի՝ 10 տարով աշխատանքային ռեսուրսի երկարացմանը, ինչպես նաև Հայկական ԱԷԿ-ում մինչև 1000 ՄՎտ հզորությամբ նոր էներգաբլոկի և Երևան ՋԷԿ-ում 250...450 ՄՎտ հզորությամբ համակցված ցիկլով աշխատող երկրորդ շոգեգազային էներգաբլոկի կառուցմանը:

Ստորև ներկայացվում է «ՀՀ էներգետիկ համակարգի երկարաժամկետ (մինչև 2036թ.) զարգացման ուղիները» փաստաթղթում [5] դիտարկված միջուկային էներգաբլոկների համեմատական գնահատականը: Փաստաթղթում ուսումնասիրվել են Հայաստանի էներգետիկ համակարգի զարգացման հեռանկարները և դրանց իրականացման ուղիները, և դիտարկվել են 40-ից ավելի սցենարներ. էներգիայի արտադրման տարբեր տեխնոլոգիաներ, ներառյալ միջուկային, ջերմային և վերականգնվող էներգետիկայի տարբերակները: Դրանցից ուսումնասիրման համար ընտրվել են միայն այն սցենարները, որոնք հիմնված են միջուկային էներգետիկայի զարգացման և ջերմային հզորությունների ընդլայնման վրա:

Փաստաթղթում դիտարկվել են հետևյալ միջուկային էներգաբլոկները՝ ՋՋԷՌ-1000, CANDU-6, 360 ՄՎտ հզորությամբ փոքր մոդուլային ռեակտոր (SMR) և ACP-600: Դիտարկված բոլոր ռեակտորները, բացի CANDU-6 ռեակտորից, PWR տեսակի ռեակտորներ են: CANDU-6 ռեակտորը նույնպես երկկոնտուր է, սակայն նեյտրոնների դանդաղեցումը կատարվում է ծանր ջրով, իսկ երկրորդ կոնտուրում որպես ջերմակիր օգտագործվում է սովորական ջուրը: ՋՋԷՌ-1000 և CANDU-6 ռեակտորները ներկայումս շահագործվում են, իսկ մյուս երկուսը գտնվում են նախագծման տարբեր փուլերում:

Աղ. 1-ում ներկայացված են միջուկային և ոչ միջուկային էներգաբլոկների հիմնական տնտեսական ցուցանիշները, որոնք ներառված են այդ փաստաթղթում:

Աղյուսակ 1

Հիմնական տնտեսական ցուցիչները՝ ըստ սցենարների

Սցենարը	ԱԷԳ-ում արտադրված էլեկտրաէներգիայի նորմավորված երկարաժամկետ միջին ինքնարժեքը (Levelized Long-term average NPP production cost, LUEC), \$/ՄՎտժ	Էներգահամակարգում արտադրվող էներգիայի երկարաժամկետ միջին ինքնարժեքը (Power system Long-term average generation cost), \$/ՄՎտժ	Նոր սերնդի տեխնոլոգիաների ներդրման ծախսերը (New generation investment cost), մլն \$	Էներգահամակարգի ընդհանուր արժեքը (Whole energy system cost), մլն \$
ՋՋԷՌ-1000	91	75,9	8,566	44,555
CANDU-6	73	69,2	6,986	43,954
SMR (360 MW)	97	77,1	6,896	44,701
ACP-600	71	73,2	5,022	44,347
Ոչ միջուկային	0	78,3	2,431	44,868

Տնտեսական ցուցիչները ցույց են տալիս, որ առաջարկվող սցենարների դեպքում դրանք շատ մոտ են միմյանց, և դրանց փոքր տարբերությունները դժվարացնում են տեխնոլոգիայի վերջնական ընտրությունը:

Այսպիսով, օգտագործելով համեմատական գնահատման MAVT մեթոդը, փորձ է արվել Հայաստանի էներգետիկայի ոլորտի վերաբերյալ որոշում կայացողների համար մշակել այդ ոլորտի զարգացման լավագույն տարբերակի գնահատման գործիքամիջոց: Հիմնվելով ՌԴ Ֆիզիկա-էներգետիկական ինստիտուտի [2] կողմից մշակված համեմատական գնահատման մեթոդի վրա՝ կատարվել են ՀՀ էներգետիկ համակարգի զարգացման տարբեր սցենարների տնտեսական չափանիշներով համեմատություններ, հաշվի առնելով յուրաքանչյուր սցենարի առանձնահատկությունները: Բացի միջուկային էներգաբլոկների համեմատությունից, էներգետիկ ոլորտի որոշում կայացնողներին կարևոր է նաև ոչ միջուկային զարգացման սցենարների մասին մանրամասն տեղեկատվության տրամադրումը:

Միջուկային էներգաբլոկների համեմատության համար անհրաժեշտ հիմնական բնութագրերը ներկայացված են աղ. 2-ում [5]:

Աղյուսակ 2

Ընտրված միջուկային էներգաբլոկների տեխնիկա-տնտեսական տվյալները

Անվանումը	ՋՋԷՌ-1000	CANDU-6	SMR	ACP-600*
Բլոկի հզորությունը, ՄՎտ	1028	670	360	610
Տարեկան առավելագույն արտադրանքը, ԳՎտժ/տարի	8105	5282	2,838	4809
Օգտակար գործողության գործակիցը	0.451	0.438	0.45	0.451
Ներդրման ծախսերը, մլն. \$**	5377	2141	2156	2440
Թարմ միջուկային վառելիքի ծախսը, \$/ՄՎտժ	6.90	2.92	7.76	6.90
Օգտագործված միջուկային վառելիքի ծախսը, \$/ՄՎտժ	0.77	5.35	1.03	1.77
Փոփոխական ծախսը, \$/ՄՎտժ	0.67	0.73	0.87	0.67
Ընդհանուր փոփոխական ծախսը, \$/ՄՎտժ	2.44	6.07	1.90	2.44
1 կՎտ հզորության արժեքը, \$/կՎտ	5230	3196	5988.42	4000.0
Տեսակարար հաստատուն ծախսը, \$/կՎտ/տարի	70.24	75.78	91.04	70.24
Հաստատուն ծախսերը, մլն.\$/տարի***	72.20	50.77	32.78	42.85
Կառուցման տևողությունը, տարի	6	6	4	6

* Բոլոր ծախսերը մոտավոր են՝ ACP-600 ռեակտորի համար ստույգ տնտեսական տվյալների բացակայության պատճառով:

** Էներգաբլոկի կառուցման ծախսերը:

*** Էներգաբլոկի՝ շահագործումից հանման ծախսերը ներգրավված են հիմնական ծախսերի մեջ [3]:

Հիմնվելով վերը նշված 11 ցուցիչների վրա՝ իրականացվել է էներգետիկայի ոլորտի զարգացման սցենարների՝ «ՀՀ էներգետիկ համակարգի երկարաժամկետ (մինչև 2036թ.) զարգացման ուղիները» փաստաթղթում դիտարկված միջուկային (4 տարբեր միջուկային էներգաբլոկներով) և ոչ միջուկային տարբերակների համեմատական գնահատում: Ելնելով երկրի առանձնահատկությունից՝ համեմատության հիմնական մակարդակների համար օգտագործվել են հետևյալ քաշային գործակիցները. ծախսերը - 0,5, նախագծի կատարման աստիճանը - 0,3, իսկ երկրի կողմից ընդունելիությունը - 0,2: Ոլորտներից կարևորությունը տրվել է էկոնոմիկայի և տվյալ տեխնոլոգիայի հասանելիության ժամանակի պահանջին, որը ընդունելի է տվյալ երկրի ոլորտների համար: Այդ ոլորտների համար ընդունվել են համապատասխանաբար 1,0 և 0,7 քաշային գործակցի արժեքները: Ցուցիչների արժեքների գնահատման համար օգտագործված մյուս քաշային գործակիցների արժեքները բերված են աղ. 3-ում:

Զարգացման սցենարների վերլուծության համեմատական գնահատման հաշվարկային ցուցիչների արժեքները համախմբված և բերված են աղ. 4-ում:

Ցուցիչների քաշային գործակիցները

Հիմնական մակարդակը	Հիմնական մակարդակի քաշային արժեքը	Ոլորտը	Ոլորտի քաշային գործակցի արժեքը	Ցուցիչների կրճատ անվանում- ները	Ցուցիչների քաշային գործակցի արժեքները	Ցուցիչների վերջնական քաշային արժեքները
<i>Ծախսեր</i>	0.500	Էկոնոմիկա	1	E.1	0.10	0.050
				E.2	0.40	0.200
				E.3	0.15	0.075
				E.4	0.35	0.175
<i>Նախագծի կատարման աստիճան</i>	0.300	Ռադիոակտիվ թափոնների կառավարում	0.4	WM.1	1.00	0.120
		Երկրի առանձնահատկություններ	0.5	CS.1	1.00	0.150
		Շրջակա միջավայրի պաշտպանություն	0.1	ENV.1	1.00	0.030
<i>Երկրի կողմից ընդունելի- ություն</i>	0.200	Տվյալ տեխնոլոգիայի հասանելիության ժամանակի պահանջը, որը ընդունելի է տվյալ երկրի համար	0.7	M.1	0.10	0.014
				M.2	0.60	0.084
				M.3	0.30	0.042
		Հասարակության կարծիքը միջուկային էներգիայի օգտագործման մասին	0.3	PA.1	1.00	0.060

Հիմնական մակարդակը	Ոլորտը	Ցուցիչը	Ցուցիչի կրճատ անվանումը	ՋՋԷՌ-1000	CANDU-6	SMR	ACP-600	Ոչ միջուկային
Ծախսեր	Էկոնոմիկա	ԱԷԿ-ում արտադրված էլեկտրաէներգիայի նորմավորված երկարաժամկետ միջին ինքնարժեք (Levelized Long-term average NPP production cost, LUEC)	E.1	91	73	97	71	103
		Էներգահամակարգում արտադրվող էներգիայի երկարաժամկետ միջին ինքնարժեք (Power system Long-term average generation cost)	E.2	75.9	69.2	77.1	73.2	78.3
		Նոր սերնդի տեխնոլոգիաների ներդրման ծախսեր (New generation investment cost)	E.3	8566	6986	6896	5022	2431
		Էներգահամակարգի ընդհանուր արժեք (Whole energy system cost)	E.4	44555	43954	44701	44347	44868

Աղյուսակ 4-ի շարունակությունը

Նախագծի կատար- ման աստիճան	Ռադիոակտիվ թափոնների կառավարում	Ռադիոակտիվ թափոնների կառավարում (Waste Management)	WM.1	1.7688	5.346	1.0296	1.7688	8
	Երկրի առանձնահատ- կություններ	Էներգետիկ անկախության մակարդակ (Energy Independency Level)	CS.1	0.585	0.331	0.511	0.500	0.349
	Շրջակա միջավայրի պաշտպանություն	Համակարգում արտադրված էլեկտրական էներգիայի քանակը՝ վերագրված ուրանի/թորիումի միավոր քանակին	ENV.1	22.4	18.1	21	21	137000
Երկրի կողմից ընունելի- ություն	Տվյալ ժամանակում էներգաբլոկի տեխնոլոգիական հասանելիություն	Նախագծման փուլ	M.1	1	1	5	4	1
		Տվյալ տեխնոլոգիայի հասանելիության ժամանակի պահանջը, որը ընդունելի տվյալ երկրի համար	M.2	2	5	4	3	1
		Լիցենզավորում և ստանդարտավորում	M.3	2	5	5	4	1
	Հասարակական կարծիքը տվյալ տեխնոլոգիայի վերաբերյալ	Հասարակական կարծիքը միջուկային էներգիայի օգտագործման մասին	PA.1	2	2	2	2	1

Եզրակացություն: Վերլուծությունը ցույց է տվել, որ այլ միջուկային էներգաբլոկներից ծանր ջրային դանդաղացուցչով՝ CANDU-6 էներգաբլոկը լավագույն ընտրությունն է տնտեսական տեսակետից, ինչը պայմանավորված է ինչպես փոքր ներդրումներով, այնպես էլ վառելիքի ցածր գնով: Տնտեսական տեսանկյունից հաջորդ նախընտրելի տարբերակն է ACP-600 էներգաբլոկը (0.305): Մյուս բոլոր այլընտրանքային էներգաբլոկներն ունեն տնտեսական ավելի ցածր ցուցանիշներ: Հակառակ դրան՝ թափոնների կառավարման տեսանկյունից ոչ նախընտրելի է CANDU-6 (0.046), քանի որ այն առաջացնում է ավելի շատ ռադիոակտիվ թափոններ՝ ի տարբերություն դիտարկվող մյուս միջուկային տեխնոլոգիաների: Այս չափանիշով լավագույնը SMR-ն է (0.120):

Երկրի համար էներգետիկ անկախության ամենաբարձր մակարդակ (0.150) ապահովում է ՋՋԷՌ-1000 էներգաբլոկը, որն ունի էլեկտրաէներգիայի արտադրության առավել մեծ կարողություն: Ակնհայտ է, որ շրջակա միջավայրի պահպանության տեսանկյունից բոլոր միջուկային տեխնոլոգիաներն ունեն զգալի առավելություն, քան ջերմային տեխնոլոգիաները (բնական գազ), քանի որ միջուկային տեխնոլոգիաներով 1 ՄՎտ էլեկտրաէներգիա արտադրելու համար ծախսվում է ավելի քիչ վառելիք: Ինչ վերաբերում է տվյալ ժամանակում էներգաբլոկի տեխնոլոգիական հասանելիությանը, ապա միջուկային էներգաբլոկներից ամենաբարձր ցուցանիշը արձանագրվել է ՋՋԷՌ-1000-ի դեպքում (0.109), որին հաջորդում է ոչ միջուկային այլընտրանքային տարբերակը (0.140):

Վերջապես, նկատելի է, որ էներգահամակարգում միջուկային էներգաբլոկների օգտագործման վերաբերյալ հասարակության կարծիքն ավելի դրական է, քան ոչ միջուկային տարբերակի վերաբերյալ: Սակայն պետք է նշել, որ այդ ցուցանիշը փոքր ազդեցություն ունի տարբերակների ընտրության վերջնական գնահատականի վրա:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Keeney R., Raiffa H.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. - J.Wiley & Sons, New York, 1976. – 592 p.
2. **Winterfeldt D. Von, Edwards W.** Decision Analysis and Behavioral Research. - Cambridge University Press, Cambridge, 1986. – 622 p.
3. **Andrianov A.** Key indicators for innovative nuclear energy systems as a guidance and tool to access sustainability of innovations. Comparative assessment of hypothetical innovative nuclear energy systems based on the kind methodology. - Obninsk, 2014. – 46p.
4. **Геворгян С.А., Авагян О.С., Марухян В.З., Геворгян А.А.** Анализ программ развития энергетической системы Республики Армения // Вестник НПОА: Электротехника, энергетика. – 2017. - № 1. – С. 9-28.

5. «ՀՀ էներգետիկ համակարգի երկարաժամկետ (մինչև 2036թ.) զարգացման ուղիները». ՀՀ կառավարության N 54 Արձանագրության թիվ 13 որոշմամբ, 10 դեկտեմբեր 2015թ.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 13.09.2017:

**С.А. ГЕВОРГЯН, А.А. ГЕВОРГЯН, В.З. МАРУХЯН, О.С. АВАГЯН,
В.О. САРГСЯН**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕБЛОКОВ
(С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ДАННОЙ СТРАНЫ)**

Представлена методика выбора наиболее приемлемых энергоблоков, в том числе и ядерных, при разработке программ прогнозирования развития энергетической области страны с учетом специфики и требований данной страны. С этой целью использован математический метод MAVT, в основе которого лежит функция одного атрибута.

Ключевые слова: энергетическая технология, энергетический индикатор, метод MAVT, ядерный энергоблок.

**S.A. GEVORGYAN, A.A. GEVORGYAN, V.Z. MARUKHYAN,
H.S. AVAGYAN, V.H. SARGSYAN**

**DEVELOPING A METHOD FOR SELECTING NUCLEAR POWER UNITS
(CONSIDERING THE REQUIREMENTS FOR THE GIVEN COUNTRY)**

A method for selecting more acceptable power units, including nuclear ones, at developing programs for forecasting the development of the country's energy area, taking into account the specifics and requirements of the country is introduced. Based on a single attribute function, the MAVT mathematical method was used to develop the method.

Keywords: power technology, energy indicator, MAVT method, nuclear power unit.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Դ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Է.Ա. ԵՂՈՅԱՆ

ՋՐԱԾՆԻ ՊԱՍՍԻՎ ԱՎՏՈԿԱՍԱԼԻՏԻԿ ՌԵԿՈՄԲԻՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՆԵՐԴՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԸ ԱՏՈՄԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՑԱՆՆԵՐՈՒՄ

Քննարկվում են խնդիրներ՝ կապված ԱԷԿ-ներում ծանր վթարների դեպքում ջրածնային անվտանգության ապահովման նպատակով ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների (ՋՊԱՌ) ներդրման հետ: Կատարվել է համեմատական վերլուծություն, որով հաստատվեց, որ փոքր նախագծային ճնշմամբ աշխատող էներգաբլոկների պարագայում ՋՊԱՌ-ի կիրառումը կարող է պայմանավորված լինել որոշակի ռիսկով՝ կապված միջավայրի իներտ կազմի ապահովման բարդությունների հետ:

Առանցքային բառեր. ԱԷԿ, ՋՋԷՌ-440, ծանր վթար, ջրածնային վտանգ, ջրածնային վտանգի մեղմում, ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատոր:

Ներածություն: ԱԷԿ-ներում հնարավոր ծանր վթարի դեպքում ջրածնային անվտանգության ապահովման համակարգերի բացակայությունը կարող է հանգեցնել դեպի շրջակա միջավայր ռադիոակտիվ արտանետումների ճանապարհին վերջին պատնեշի՝ ռեակտորային շինության ամբողջականության կորստին, որի պահպանումը ծանր վթարի կառավարման գերակա խնդիրներից մեկն է: Ծանր վթարի կառավարման համատեքստում կարևորագույն խնդիր է ջրածնային վտանգի մեղմման ռազմավարությունների արդյունավետ իրագործումը, ինչը շահագործվող բազմաթիվ ԱԷԿ-ներում, մասնավորապես՝ ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկում, դեռ ամբողջությամբ լուծված չէ և շարունակում է պահպանել իր արդիականությունը:

Շատ ԱԷԿ-ներում (հատկապես ջրա-ջրային տեսակի ռեակտորով), հնարավոր ծանր վթարների դեպքում, որպես ջրածնային վտանգի մեղմման հիմնական ռազմավարություն, դիտարկվում են, իսկ որոշներում էլ արդեն կիրառվում են ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների (ՋՊԱՌ) համակարգեր:

Ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորներն ամբողջովին պասսիվ սարքավորումներ են և ունեն մի շարք դրական հատկանիշներ: Դրանց աշխատանքը մեկնարկում է միջավայրում ջրածնի կոնցենտրացիայի որոշակի արժեքին հասնելուն պես, դրանք չունեն շարժական մասեր և չեն պահանջում արտաքին էներգիայի առկայություն [1]: ՋՊԱՌ-ի աշխատանքը հիմնված է կատալիտիկ թիթեղների մակերեսին ջրածնի և թթվածնի ռեկոմբինացիայի էկզոթերմիկ ռեակցիայի վրա: Ռեկոմբինատորներն ապահովում են ջրածնի դանդաղ այրում (առանց

բոցի) և չեն հանգեցնում միջավայրի ջերմաստիճանի կամ ճնշման թռիչքաձև աճին: Ռեկոմբինացիայի մեկնարկի համար անհրաժեշտ ջրածնի նվազագույն ծավալային կոնցենտրացիան սովորաբար կազմում է 1...2%, որը բավականին ցածր է վերջինիս այրման և դետոնացիայի նվազագույն կոնցենտրացիոն սահմաններից [2]: Նշված բնութագրերը որոշ վերապահումներով կարելի է վերագրել ՋՊԱՌ-ի դրական հատկանիշներին, սակայն գոյություն ունեն որոշ բացասական առանձնահատկություններ ևս, որոնք կարող են սահմանափակել դրանց կիրառումը: Մասնավորապես, ՋՊԱՌ-ի համակարգերը կարող են ապահովել ջրածնի հեռացման դանդաղ դինամիկա (մի քանի գրամ վայրկյանում)՝ համեմատած առաջացման տիպիկ արագությունների հետ [3]: Բացի այդ, հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ՋՊԱՌ-ի թիթեղների ջերմաստիճանը ինտենսիվ ռեկոմբինացիայի արդյունքում կարող է զգալիորեն բարձրանալ, գերազանցելով ջրածնի ինքնաբռնկման ջերմաստիճանը: Համաձայն [4]-ում ներկայացված հետազոտության արդյունքների՝ ջրածնի 8% ծավալային կոնցենտրացիայի դեպքում կատալիտիկ թիթեղների ջերմաստիճանը հասնում է 833 Կ, որը գերազանցում է ջրածնի ինքնաբռնկման ջերմաստիճանը: Հաշվի առնելով, որ ռեկոմբինատորները պասսիվ սարքավորումներ են, կատալիտիկ թիթեղների ջերմաստիճանի անմիջական կարգավորում գործնականում հնարավոր չէ իրականացնել, հետևաբար, ՋՊԱՌ-ը, հանդիսանալով ջրածնային վտանգի մեղմման հիմնական միջոցներից մեկը, որոշակի պայմաններում ինքնին վերածվում է ջրածնի բռնկման աղբյուրի: Վերոնշյալ խնդրից խուսափելու համար հարկավոր է ապահովել միջավայրի իներտ կազմ, որը կարելի է իրականացնել ջրային գոլորշու բարձր կոնցենտրացիայի (55% և ավելի) ապահովման եղանակով:

Ջրածնային խնդրի լուծումը պահանջում է կոնկրետ էներգաբոլկի նախագծի և վթարային սցենարների խոր և համակողմանի վերլուծություն, և որոշ դեպքերում էլ՝ այլընտրանքային մոտեցումների մշակում: Այդ առումով, ջրածնային անվտանգության տեսանկյունից, ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով առաջին սերնդի էներգաբոլկները (ինչպիսին է նաև ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբոլկը) ունեն շատ կարևոր նախագծային առանձնահատկություններ, ինչը խիստ բարդացնում է ՋՊԱՌ-ի կիրառումը: Հերմետիկ գոտու նախագծային ճնշումը համեմատաբար ցածր է, և ռեակտորային հերմետիկ շինությունը ճնշման բարձրացումից պաշտպանելու համար տեղադրված են պաշտպանիչ փականներ՝ դեպի շրջակա միջավայր արտանետմամբ: Պայմանավորված այս հանգամանքով, հնարավոր չէ արդյունավետ կերպով իրականացնել միջավայրի իներտ կազմի ապահովում ջրային գոլորշով, որի դեպքում հարկավոր է ապահովել ջրային գոլորշու բարձր կոնցենտրացիա և, հետևաբար, բարձր ճնշում: Բացի այդ, ՋՊԱՌ-ի աշխատանքը վերոնշյալ էներգաբոլկների հերմետիկ շինության փոքր ծավալի և փոքր նախագծային

Ճնշման պայմաններում կարող է զգալիորեն մեծացնել միջավայրի ջերմաստիճանը և հանգեցնել արտանետման փականների ավելի հաճախակի բացվելուն, որով էլ պայմանավորված՝ կմեծանան ռադիոակտիվ արտանետումները դեպի շրջակա միջավայր (եթե չեն ձեռնարկվում ջերմության հեռացման ապահովմանն ուղղված համապատասխան միջոցառումներ):

Ժամանակակից էներգաբլոկներում, որոնք ունեն մեծ հերմետիկ շինություն (օրինակ՝ ՋՋԷՌ - 1000 ռեակտորով կամ PWR ռեակտորով արևմտյան նախագծի էներգաբլոկները) և նախատեսված են համեմատաբար բարձր նախագծային ճնշման պայմաններում աշխատելու համար (400...600 կՊա), ջրածնային վտանգի մեղմման հիմնական ռազմավարությունը ՋՊԱՌ-ի համակարգի ներդրումն է: Միջավայրի անվտանգ կազմի պահպանումը հնարավոր է ջրային գոլորշու բարձր կոնցենտրացիայի ապահովման եղանակով: Ի տարբերություն վերոնշյալ տիպի էներգաբլոկների՝ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների հերմետիկ գոտում առավելագույն բացարձակ ճնշումը, որը հնարավոր է պահպանել, զգալիորեն ցածր է: Մասնավորապես՝ ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի դեպքում, հաշվի առնելով արտանետման փականների ավտոմատ բացման դրվածքային ճնշման մեծությունը, որը մոտ 73,5 կՊա է, և մթնոլորտային ճնշումը, որը մոտ 90 կՊա է, հերմետիկ գոտում առավելագույն բացարձակ ճնշումը, որը կարելի է պահպանել, մոտավորապես կազմում է 160 կՊա:

ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ շինությունում ջրային գոլորշու բարձր կոնցենտրացիայի ապահովման համար անհրաժեշտ է, որ օդի պարունակությունը լինի սկզբնականի համեմատ զգալիորեն ցածր (հերմետիկ շինությունից օդի արտանետման բարձր աստիճան): ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի հերմետիկ շինության հարմարադասման վերլուծությունները և հնարավոր ծանր վթարային սցենարների ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ հնարավոր են օդի փոքր արտանետումներ սցենարներ (մինչև վթարի ծանր փուլի սկսվելը): Այս հանգամանքը խիստ սահմանափակում է ջրային գոլորշու կոնցենտրացիայի բարձրացման հնարավորությունը, այսինքն, որոշ սցենարներում սպասվում են գոլորշու բավականին ցածր կոնցենտրացիաներ, որոնց դեպքում ՋՊԱՌ-ի առկայությունը կարող է խիստ ռիսկային լինել, կապված դրանց գերտաքացման և դրանով պայմանավորված՝ ջրածնի ինքնաբռնկման վտանգի մեծացման հետ: Վերոնշյալ էներգաբլոկներում ՋՊԱՌ-ի ներդրման խնդիրը բարդանում է նաև՝ կապված էներգաբլոկի փոքր ռեկատորային շինության, ինչպես նաև ռեակտորում ցիրկոնիումի համեմատաբար մեծ զանգվածի հետ, ինչի հետևանքով ծանր վթարի դեպքում հերմետիկ շինությունում ջրածնի, ինչպես նաև ջրային գոլորշու և մյուս կոմպոնենտների կոնցենտրացիաների փոփոխությունը կա-

րող է ընթանալ համեմատաբար արագ՝ ուղեկցվելով ջրածնի ավելի բարձր պիկային կոնցենտրացիաների ձևավորմամբ:

Համադրելով և հաշվի առնելով ներկայացված խնդիրները, ինչպես նաև նկատի առնելով դրանց արդիականությունը ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկի համար, սույն աշխատանքի շրջանակներում խնդիր է դրվել՝ անալիտիկ եղանակով գնահատելու ժամանակակից էներգաբլոկներում և ՀԱԷԿ-ի գործող էներգաբլոկում ՋՊԱՌ-ի սպասվող արտադրողականության տիրույթները, ինչպես նաև պարզելու դրա վրա անուղղակի ազդման եղանակները:

Հետազոտության արդյունքները: Հայտնի է, որ ՋՊԱՌ-ի տարբեր մոդելները հիմնականում միմյանցից տարբերվում են կատալիտիկ թիթեղների քանակությամբ և չափերով, սակայն դրանք բոլորն էլ ունեն աշխատանքի միևնույն սկզբունքը, ուստի կարելի է սպասել, որ միջավայրի կազմի փոփոխության հետևանքով դրանց արտադրողականության փոփոխությունը որոշակի մոտավորությամբ կենթարկվի միևնույն օրինաչափությանը: Այս առանձնահատկությունը ճշտելու համար հաշվարկային եղանակով դիտարկվել են առավել մեծ տարածում ունեցող 3 տարբեր մակնիշների ռեկոմբինատորներ (արտադրողներ՝ AECL, AREVA, NIS), որոնց արտադրողականության որոշման համար օգտագործված մաթեմատիկական կախվածությունները ներկայացված են ստորև [5].

$$\dot{r}_{H2} = (0.15196 \cdot C_{H2} + 0.0126 \cdot C_{H2}^2) \cdot (198/T)^{1.10974} \cdot P^{0.57769} [lq/d], \quad (1)$$

$$\dot{r}_{H2} = \eta \cdot \min(C_{H2}, 2 \cdot C_{O2}, 8) \cdot (A \cdot p + B) \cdot \tanh(X_{H2} - 0.5) [q/l], \quad (2)$$

$$\dot{r}_{H2} = 1.134 \cdot C_{H2}^{1.307} \cdot (P/RT) [q/l], \quad (3)$$

որտեղ $\dot{r}_{H2} [lq/d]$ -ը ջրածնի ռեկոմբինացիայի զանգվածային ինտենսիվությունն է, P -ն՝ միջավայրի ճնշումը $[Pa]$, T -ն՝ միջավայրի բացարձակ ջերաստիճանը $[K]$, R -ն՝ ունիվերսալ գազային հաստատունը, η -ն՝ ռեկոմբինատորի արդյունավետությունը տվյալ պայմաններում, C_{H2} - $[\%]$ -ը՝ ջրածնի ծավալային կոնցենտրացիան ռեկոմբինատորի մուտքում, C_{O2} - $[\%]$ -ը՝ թթվածնի ծավալային կոնցենտրացիան ռեկոմբինատորի մուտքում, A -ն և B -ն՝ փորձնականորեն ստացված հաստատուններ:

Համեմատական վերլուծություն իրականացնելու համար սահմանվել է միջավայրի կազմերի որակապես տարբերվող համախումբ: Միջավայրի կազմը սահմանելիս հաշվի է առնվել իրականում սպասվող պարամետրերի տիրույթը՝ ելնելով հետևյալից.

• Օղի քանակությունը համապատասխանում է նորմալ շահագործման պայմանների վիճակին (ծանր վթարի սկզբնական փուլ, երբ թթվածնի քանակությունը դեռ էականորեն չի նվազել ռեկոմբինացիայի արդյունքում):

• Ջրային գոլորշու քանակությունը փոփոխվում է լայն տիրույթում՝ ապահովելով հերմետիկ սրահներում ճնշման մեծության փոփոխություն մթնոլորտայինից մինչ առավելագույն սպասվող արժեքը՝ 600 կՊա:

• Ջրածնի քանակության համար ընտրվել են 2 արժեքներ, որոնց ցածր ջերմաստիճանների տիրույթում (323 Գ) համապատասխանում են պարզիալ ճնշման 4 և 8 կՊա մեծությունները: Ջրածնի կոնցենտրացիայի հետագոտված տիրույթը սահմանափակվել է 8% մեծությամբ, ինչը կապված է ռեկոմբինատորների կիրառման նպատակային չափորոշիչների հետ (քննարկվում է ստորև):

ՁՊԱՌ-ի համակարգի ներդրման հիմնական նպատակն է սահմանափակել ջրածնի կոնցենտրացիան այնպիսի մեծությամբ, որի պայմաններում գազային միջավայրի բռնկումը չի հանգեցնի որևէ բացասական հետևանքի հերմետիկ շինության ամբողջականության տեսանկյունից: Յուրաքանչյուր էներգաբլոկի կամ հերմետիկ շինության տեսակի համար կոնցենտրացիայի այդ մեծությունը որոշվում է՝ շինության ամրության պաշարի վրա հիմնվելով: Սակայն, հաշվի առնելով ջրածնի այրման պրոցեսի բնութագրերը կոնցենտրացիայի տարբեր տիրույթներում, կարելի է սահմանել կոնցենտրացիայի թույլատրելի սահման, որը կիրառելի կլինի հերմետիկ շինության գրեթե բոլոր տեսակների դեպքում:

Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ ջրածնի ցածր կոնցենտրացիաների դեպքում այրումն ընթանում է ասիմետրիկ կերպով [6].

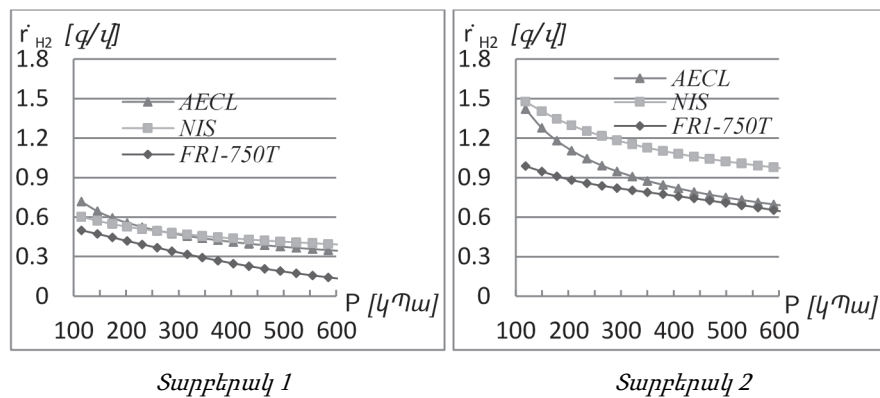
• ջրածնի 4,1...6% ծավալային կոնցենտրացիայի դեպքում բոցը հիմնականում տարածվում է դեպի վերև,

• ջրածնի 6...9% ծավալային կոնցենտրացիայի դեպքում բոցը տարածվում է ինչպես վերև, այնպես էլ հորիզոնական ուղղությամբ,

• ջրածնի 9% և ավելի կոնցենտրացիայի դեպքում բոցը տարածվում է բոլոր ուղղություններով, սակայն դեպի վերև տարածման արագությունը կարող է մի փոքր մեծ լինել: Այս ասիմետրիան վերանում է միջավայրի բարձր տուրբուլենտության դեպքում:

Մյուս կողմից՝ փորձերը ցույց են տվել, որ ջրածնի 4...8% ծավալային կոնցենտրացիաների դեպքում ջրածինը ամբողջությամբ չի այրվում, իսկ բոցի տարածման արագությունները համեմատաբար փոքր են: Այրման խորությունը մեծանում է ջրածնի կոնցենտրացիայի մեծացմանը զուգընթաց և հասնում է 100%, երբ ջրածնի կոնցենտրացիան կազմում է 8...10% [6]: Հետևաբար, սպասվում է, որ մինչ 8% ջրածնի կոնցենտրացիաների պայմաններում բռնկման հետևան-

քով տեղի ունեցող ճնշման աճը կլինի համեմատաբար փոքր և հերմետիկ շինության տեսակների մեծ մասի համար՝ ոչ վտանգավոր: Պարզ է դառնում, որ ջրածնի կոնցենտրացիան 8% մեծությամբ սահմանափակելը կարելի է առաջին մոտավորությամբ համարել ռեկոմբինատորների ներդրման նպատակային չափորոշիչ: Հաշվի առնելով նշվածը՝ տվյալ աշխատանքի շրջանակներում կատարված հաշվարկային գնահատումների ժամանակ դիտարկվել է ջրածնի կոնցենտրացիայի մինչ 8% տիրույթը: Նկ.1-ում ներկայացված են հաշվարկների արդյունքները՝ ջրածնի պարգիալ ճնշման 4 կՊա (տարբերակ 1) և 8 կՊա (տարբերակ 2) մեծությունների դեպքում:

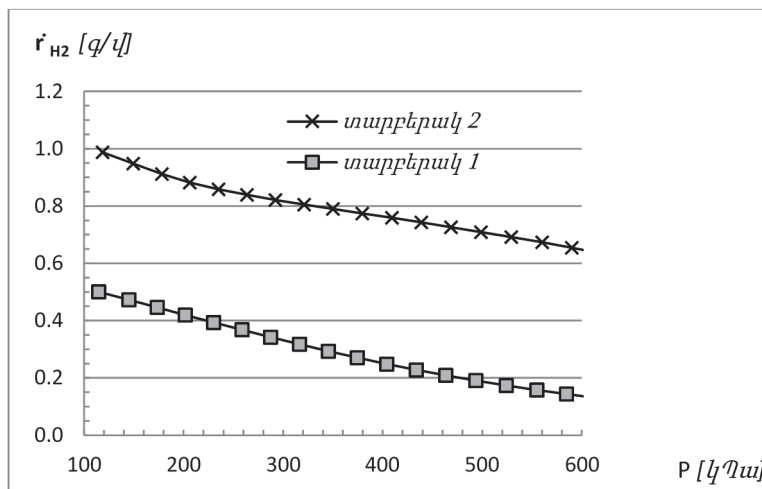


Նկ.1. Դիտարկված տեսակի ռեկոմբինատորների արտադրողականության կախվածությունը ճնշումից (ջրածնի պարունակության 2 տարբերակների դեպքում)

Իրականացված գնահատումների արդյունքները ցույց տվեցին, որ բոլոր 3 տեսակի ռեկոմբինատորների դեպքում, միջավայրի կազմի փոփոխությունից կախված, դրանց արտադրողականության փոփոխության օրինաչափությունը գրեթե միևնույնն է (արտադրողականության բացարձակ արժեքների տարբերությունը հիմնականում պայմանավորված է սարքերի չափերի և կատալիտիկ մակերևույթների մակերեսների տարբերությամբ): Դա կարելի է բացատրել այն հանգամանքով, որ անկախ ԶՊԱՌ-ի մակնիշից՝ դրանք ունեն աշխատանքի միևնույն սկզբունքը:

Նկ.1-ում բերված արդյունքների համեմատական վերլուծությունից պարզ է դառնում, որ դիտարկված մակնիշի ռեկոմբինատորների արտադրողականության փոփոխությունը, շոգեզագային խառնուրդի ճնշման յուրաքանչյուր 100 կՊա փոփոխման հետևանքով, կազմում է շուրջ 20% : Նշված բնութագիրը էականորեն շեղված է միայն AECL-ի մոդելի ռեկոմբինատորի դեպքում՝ ջրածնի համեմատաբար բարձր պարունակության դեպքում և ճնշման 100...200 կՊա տիրույթում, կազմելով մոտ 30%: Այսինքն, գոյություն ունեցող նվազեցումը կարող է հանգեցնել ռեկոմբինացիայի ինտենսիվության զգալի աճին:

Ինչպես արդեն հիմնավորվեց, միջավայրի կազմի և ճնշման փոփոխությունը միևնույն կերպ է ազդում տարբեր մակնիշի ռեկոմբինատորների արտադրողականության վրա: Այս հանգամանքը հաշվի առնելով, հետագա բոլոր հաշվարկային հետազոտություններն իրականացվել են FR1-750T մակնիշի ռեկոմբինատորի բնութագրերի դիտարկմամբ: Նկ.2-ում ներկայացված է FR1-750T մակնիշի ռեկոմբինատորի արտադրողականության կախվածությունը ճնշումից դիտարկվող հաշվարկային տարբերակների դեպքում:



Նկ. 2. Ջրածնի ռեկոմբինացիայի ինտենսիվության փոփոխությունը՝ կախված ճնշումից, դիտարկված հաշվարկային տարբերակների դեպքում

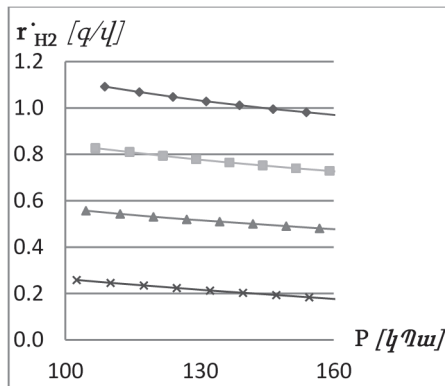
Նկ.2-ում ներկայացված արդյունքներից ակնհայտ է դառնում, որ դիտարկված FR1-750T մոդելի ռեկոմբինատորի արտադրողականությունը առավելապես զգայուն է ջրածնի սկզբնական կոնցենտրացիայի նկատմամբ և էականորեն նվազում է ջրային գոլորշու քանակության ավելացմանը զուգահեռ: Պարզ է դառնում, որ միջավայրում ջրային գոլորշու քանակության նվազումը կարող է նպաստել ռեկոմբինատորի արտադրողականության զգալի մեծացմանը (կապված ջրային գոլորշու հարաբերական կոնցենտրացիայի նվազման և ջրածնի ու թթվածնի հարաբերական կոնցենտրացիաների աճի հետ): Այս եղանակով նույնիսկ կարելի է անուղղակի ձևով ազդել ՋՊԱՌ-ի արտադրողականության վրա:

Փոքր նախագծային ճնշմամբ հերմետիկ գոտիով էներգաբլոկներն ունեն մի շարք էական նախագծային առանձնահատկություններ, որոնք պետք է հաշվի առնել ՋՊԱՌ-ի ներդրումից առաջ: Կոնսերվատիվ գնահատումների համաձայն՝ միջավայրի իներտ կազմի ապահովման համար (ջրային գոլորշու կոնցենտրացիայի առնվազն 55%) հերմետիկ գոտում անհրաժեշտ կլինի ապահովել մոտ

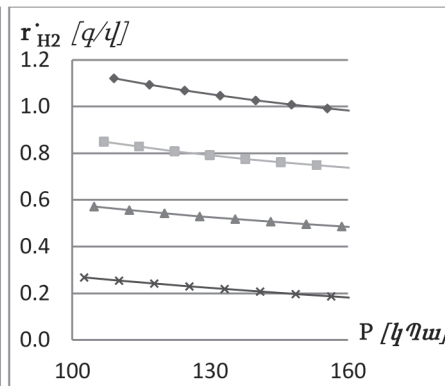
290 կՊա և ավելի բացարձակ ճնշում (օդի չնվազած քանակի դեպքում): Ժամանակակից էներգաբլոկների ճնշող մեծամասնության դեպքում այս խնդիրը լուծելի է: Խնդիրը բարդանում է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների դեպքում, երբ հերմետիկ շինությունում նման բարձր ճնշման ապահովումը գործնականում հնարավոր չէ, քանի որ վերջինս սահմանափակվում է արտանետման փականների բացման դրվածքային ճնշմամբ: Ասվածից կարելի է եզրակացնել, որ նշված էներգաբլոկների դեպքում ՋՊԱՌ-ի համակարգի ներդրումը ամեն դեպքում կապված կլինի որոշակի ռիսկի հետ. ոչ բոլոր ծանր վթարների սցենարների ընթացքում հնարավոր կլինի պահպանել միջավայրի իներտ կազմ: Հետևաբար՝ որոշակի պայմանների դեպքում վերջիններս կարող են վերածվել ջրածնի բռնկման աղբյուրի:

Ինչպես արդեն նշվեց, փոքր հերմետիկ շինությամբ և փոքր նախագծային ճնշմամբ առաջին սերնդի էներգաբլոկներում, ինչպիսիք են ՋՋԷՌ-440 տիպի ռեակտորներով էներգաբլոկները, ՋՊԱՌ-ի աշխատանքային պայմանները էականորեն տարբեր են, և հետևաբար՝ արդյունավետությանը վերաբերող ցուցանիշները, որոնք պետք է սպասել ճնշման բարձր արժեքների պայմաններում, այս դեպքում, հավանաբար, կարող են տարբերվել: Այդ հանգամանքը խիստ կարևոր է ինչպես դրանց օպտիմալ թվաքանակի ընտրության, այնպես էլ դրանց անվտանգ աշխատանքային պարամետրերի տիրույթների սահմանման տեսանկյունից:

Նկ.3-ում ներկայացված է AREVA կազմակերպության կողմից արտադրվող FR1-750T տիպի ռեկոմբինատորի արտադրողականության փոփոխությունը միջավայրի այնպիսի պայմանների դեպքում, որոնք առավել բնութագրական են վերոհիշյալ էներգաբլոկների համար: Առավել բնութագրական արդյունքների ստացման նպատակով՝ հաշվարկները կատարվել են միջավայրի սկզբնական 2 տարբեր վիճակներին համապատասխանող տարբերակների համար (միջավայրի սկզբնական պայմաններն ընտրվել են օդի սկզբնական քանակությունից տարբեր սկզբնական քանակի՝ 20%, և 60% արժեքների դեպքում), իսկ ջրածնի սկզբնական քանակություններն ընդունվել են համապատասխանաբար 2 կՊա, 4 կՊա, 6 կՊա և 8 կՊա: Հաշվարկային տարբերակներում, կախված ջրային գոլորշու պարօցիալ ճնշումից, փոփոխվել են ինչպես միջավայրի կազմը, այնպես էլ ջերմաստիճանը:



Տարբերակ 1



Տարբերակ 2

Նկ.3. Ռեկոմբինացիայի ինտենսիվության կախվածությունը ճնշումից միջավայրի սկզբնական տարրեր պայմանների դեպքում

Համեմատելով նկ.3-ում ներկայացված արդյունքները, ակնհայտ է դառնում, որ դիտարկված հաշվարկային դեպքերում օդի սկզբնական քանակության փոփոխությունը էական ազդեցություն չունի ռեկոմբինատորի սպասվող արտադրողականության վրա: Համադրելով նկ.2-ում և 3-ում բերված արդյունքները, պարզ է դառնում, որ ինչպես ժամանակակից էներգաբլոկներում, այնպես էլ առաջին սերնդի էներգաբլոկներում ռեկոմբինատորների սպասվող արտադրողականության արժեքները (ճնշման 100...160 կՊա միջակայքում) գտնվում են գրեթե միևնույն տիրույթներում:

Օդի սկզբնական ցածր պարունակությամբ դեպքերը (նկ.3 գ, դ), որոնք առանձնանում են գոլորշու բարձր և օդի ցածր պարունակությամբ, առավելապես բնութագրական կարող են լինել այն պայմաններում, երբ տևական ռեկոմբինացիայի հետևանքով թթվածնի քանակությունը զգալիորեն նվազում է:

Ընդհանրացնելով հետազոտության արդյունքները՝ կարելի է կատարել հետևյալ հիմնական եզրակացությունները.

- Տարբեր մոդելների ՋՊԱՌ-ների արտադրողականության փոփոխության անալիտիկ ուսումնասիրության արդյունքների վերլուծությունը ցույց տվեց, որ ջրային գոլորշու քանակի փոփոխությունը խառնուրդում միևնույն ձևով է անդրադառնում վերջիններիս արտադրողականության վրա:

- Նախագծային փոքր ճնշմամբ հերմետիկ գոտիով էներգաբլոկներում ՋՊԱՌ-ի ներդրման հետ կապված հիմնական սահմանափակող գործոնը պայմանավորված է դրանց անվտանգ աշխատանքային պարամետրերի ապահովման խնդրով:

• ԶՊԱՌ-ի արտադրողականության վրա անուղղակի ազդման գործնականորեն իրագործելի եղանակ կարող է լինել գոլորշու կոնցենտրացիայի կարգավորումը, որը կարելի է իրագործել սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի կառավարմամբ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. CFD Analysis of Passive Autocatalytic Recombiner / **B. Gera, P. K. Sharma, et al** // Science and Technology of Nuclear Installations.- 2011, Article ID 862812, 9 doi:10.1155/2011/862812.
2. Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety/ **W. Breitung, C. Chan, et al** NEA/CSNI/R(2000)7.
3. Final Results of the Hydrogen Igniter Experimental Program-NUREG/CR-2486 UCRL-53036 R-4.-February, 1982.
4. IAEA, “Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors”.- IAEA-TECDOC-1196-Vienna, 2001.
5. **Stephan Kelm, Wilfried Jahn, Ernst-Arndt Reinecke**. Operational behaviour of catalytic recombiners—experimental results and modelling approaches.- <http://www.oecd-neo.org/nsd/csni/cfd/workshops/XCFD4NRS/technical-sessions/co/CO-06.pdf>
6. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants - IAEA-TECDOC-1661.-Vienna, 2011.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 16.01.2018:

В.Г. ПЕТРОСЯН, А.Д. ГРИГОРЯН, Е.А. ЕГОЯН

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ПАССИВНЫХ АВТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Обсуждаются проблемы, связанные с внедрением пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода (ПАРВ) в целях обеспечения водородной безопасности на атомных электростанциях (АЭС) в случае тяжелых аварий. Проведен сравнительный анализ, который подтвердил, что в случае энергоблоков старшего поколения с малым расчетным давлением применение ПАРВ может быть связано с определенным риском в зависимости от сложности обеспечения инертной среды. Предложен косвенный способ повышения производительности ПАРВ.

Ключевые слова: атомная электростанция, ВВЭР-440, тяжелая авария, водородный риск, смягчение водородного риска, пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода.

V.G. PETROSYAN, A.D. GRIGORYAN, E.A. YEGHOYAN

**PROBLEMS OF IMPLEMENTING PASSIVE AUTOCATALYTIC HYDROGEN
RECOMBINERS AT NUCLEAR POWER PLANTS**

The problems associated with the implementation of passive autocatalytic hydrogen recombiners (PARH) in order to ensure hydrogen safety at the NPP at severe accidents are discussed. A comparative analysis is carried out which confirms that in case of older generation power units with a small design pressure, implementation of PARH may be associated with a certain risk, depending on the complexity of providing an inert environment. An indirect way to increase the performance of PARH is proposed.

Keywords: NPP, WWER-440, severe accident, hydrogen risk, hydrogen risk mitigation, hydrogen passive autocatalytic recombiner.

Տ.Ա. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ՁԵՐՄԱՅԻՆ ՏԵՂԱԲԱՇԽՄԱՆ
ԷՎՈԼՅՈՒՑԻՈՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Առաջարկված է ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) տարրերի ջերմային տեղաբաշխման մեթոդ՝ հիմնված Էվոլյուցիոն ալգորիթմի վրա: Մշակվել է տեղաբաշխման Էվոլյուցիոն ալգորիթմի հետազոտման ծրագրային միջոց, որի իրագործումը ցույց է տվել առաջարկված մեթոդի արդյունավետությունը ջերմային դաշտի համահարթեցման տեսանկյունից:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա, ջերմային տեղաբաշխում, Էվոլյուցիոն ալգորիթմ:

Ներածություն: ԻՄ-երի ինտեգրման անշեղ աճը հանգեցնում է դրանց հետագա զարգացման դանդաղեցմանը՝ պայմանավորված ի հայտ եկող տեխնոլոգիական և ֆունկցիոնալ մի շարք գործոններով: Համաձայն կիսահաղորդչային արդյունաբերության ասոցիացիայի կանխատեսումների՝ ԻՄ-երի զարգացման հիմնական խոչընդոտներից են [1]՝

- տեսակարար էներգասպառման աճը,
- աշխատանքային ջերմաստիճանների աճը,
- կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա մեծ ջերմային զրադիենտի առկայությունը:

Քանի որ ԻՄ-երի ջերմային հուսալիությունը խիստ կախված է աշխատանքային ջերմաստիճանից [2], իսկ վերջինս, իր հերթին, մեծապես կախված է տարրերի տեղաբաշխումից, ապա նրանց հուսալիության բարձրացման տեսանկյունից խիստ կարևորվում է տարրերի ջերմային տեղաբաշխման խնդիրը: Վերջինս հնարավորություն է տալիս ջերմային դաշտի համահարթեցման ճանապարհով փոքրացնել ջերմային զրադիենտը, ինչի հետևանքով նվազում է առավելագույն ջերմաստիճանով լրկալ տեղամասերի ջերմաստիճանը, և դրանով իսկ բարձրանում է հուսալիությունը: Ջերմային տեղաբաշխման մեթոդները ջերմային դաշտի համահարթեցման խնդիրը լուծում են երկու փուլով [3-5]՝

• նախնական տեղաբաշխում՝ հիմնված մոտավոր և արագագործ ալգորիթմների վրա,

• վերջնական տեղաբաշխում կամ օպտիմալացում, երբ կիրառելով բազմակի ալգորիթմներ, լավարկվում է նախնական տեղաբաշխումը՝ հաշվի առնելով նախորդ փուլում հաշվի չառած մյուս պարամետրերը:

ԻՄ-երի տարրերի նախնական ջերմային տեղաբաշխման ալգորիթմները կարելի է բաժանել երկու հիմնական դասերի [5, 6].

- մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմներ,
- մատրիցների վրա հիմնված ալգորիթմներ:

Մասնատման վրա հիմնված ալգորիթմների հիմքում ընկած է տարրերի նախնական դասակարգումը՝ ըստ նրանց հզորությունների, տեղաբաշխման տարածքում, դրանց հետագա հնարավորինս հավասարաչափ ցրմամբ, որոշակի էվրիստիկ ընթացակարգերի օգտագործմամբ: Այսպիսի մոտեցումը, տարրերի մեծ քանակի դեպքում հանգեցնում է էվրիստիկ անորոշությունների և տեղաբաշխման որակի անկման:

Ներկայումս հայտնի մատրիցային ալգորիթմները, տեղաբաշխում կատարելիս, շարժվում են հստակ նախանշված քայլերի հերթականությամբ, որը միշտ տալիս է միննույն ելքային արդյունքը նույն մուտքային տվյալների դեպքում: Այսպիսի մոտեցումներից են ռեկուսիվ մասնատման և տեղաբաշխման վրա հիմնված ալգորիթմները [7]: Դրանց թերությունն այն է, որ որոշակի քանակի իտերացիաներ կատարելուց հետո ալգորիթմը հանգեցնում է որոշակի լոկալ օպտիմումի, այսինքն՝ չի դիտարկում ստացված արդյունքից հնարավոր ավելի լավ տեղաբաշխման առկայությունը: Այս ալգորիթմները ձգտում են՝ տարրերի հստակ սահմանված եղանակով տեղաբաշխման միջոցով հասնելու լոկալ տեղամասում գումարային էներգասպառման մինիմումի, բայց չեն դիտարկում ընդհանուր արդյունքը:

Սույն հոդվածում ներկայացվում է ԻՄ-երի ջերմային դաշտի լավարկման էվոլյուցիոն ալգորիթմը: Մշակված ալգորիթմը դասվում է մատրիցների վրա հիմնված ալգորիթմների շարքը: Այն կիրառելի է նախնական տեղաբաշխման փուլում միայն ջերմային պարամետրերի դիտարկմամբ, իսկ մյուս պարամետրերը հաշվի առնելով՝ կարելի է տեղաբաշխման լավարկում կատարել օպտիմալացման փուլում:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: ԻՄ-երի տարրերի տեղաբաշխման խնդիրը կարելի է ներկայացնել տրված քանակությամբ սյուներ և տողեր պարունակող մատրիցում յուրաքանչյուր տարրի հնարավոր դիրքը որոշելու խնդրի տեսքով: Այդպիսի մոտեցումը ճշգրիտ է ռեգուլյար կառուցվածքների դեպքում, ինչպիսիք են փականային մատրիցների վրա կառուցված ԻՄ-երը: Տարաչափ տարրերի դեպքում, ինչպիսիք են ստանդարտ տարրերի գրադարանների հիման վրա նախագծվող ԻՄ-երի տարրերը, խնդիրը կարելի է ներկայացնել որպես կոպիտ տեղաբաշխման խնդիր՝ տրված $m = k \cdot p$ քանակությամբ տարրերը m դիրքեր պարունակող $k \cdot p$ չափսի մատրիցում տեղակայելով, պայմանով, որ նախնական տեղաբաշխումից հետո՝ լեգալացման փուլում, կկատարվի փոխ-

ծածկումներ առաջացնող տարրերի վերադասավորում: Այսպիսով, ջերմային տեղաբաշխման խնդիրը կարելի է ձևայնացնել և բերել մատրիցային տեսքի:

Վերոնշյալ մատրիցային մոտեցումը հայտնի է որպես մատրիցային սինթեզի խնդիր (ՄՄԽ), որը կոմբինատոր օպտիմալացման խնդիր է [7]: Եթե տեղաբաշխվող տարրերի հզորությունները ներկայացնենք որպես դրանց արժեքներին համապատասխանող թվերի զանգված, ապա ՄՄԽ-ի նպատակն է տրված թվերի ցուցակից սինթեզել այնպիսի մատրից, որ նրա տրված չափսի յուրաքանչյուր ենթամատրիցի ներսի տարրերի գումարը չունենա տրված որոշակի արժեքից մեծ արժեք [7]: Ընդհանուր առմամբ, ՄՄԽ-ի մաթեմատիկական ձևակերպումը հետևյալն է. տրված է ամբողջ տիպի t, m, n ոչ բացասական թվերի ցուցակ $m \times n$ չափսի՝ $X_0, X_1, \dots, X_{m \times n - 1}$, անհրաժեշտ է սինթեզել այնպիսի մատրից տրված թվերի ցուցակից, որ նրա յուրաքանչյուր $t \times t$ չափսի ենթամատրից լինի նվազագույնը [7]: Տեղաբաշխման որակի չափանիշը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$F = \max_{j \in E} \sum_{i \in \Omega_j} P_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

որտեղ E -ն ենթամատրիցների ինդեքսների բազմությանն է, j -ն՝ հերթական ենթամատրիցի ինդեքսը, Ω_j -ն՝ հերթական ենթամատրիցը, i -ն՝ ենթամատրիցի հերթական տարրը, P_i -ն՝ հերթական տարրի հզորությունը:

Ապացուցված է, որ $t \geq 2$ դեպքում ՄՄԽ-ն NP լրիվ խնդիր է [7]:

Խնդրի նման բարդության հաղթահարման նպատակով մշակվել է էվոլյուցիոն ալգորիթմ: Այն բաղկացած է հետևյալ հիմնական փուլերից՝

1. մուտքային սերնդի պոպուլյացիայի գեներացում,
2. խաչասերում,
3. մուտացիա,
4. սելեկցիա,
5. $|F_p - F_c| < \varepsilon$ պայմանի ստուգում և տեղի չունենալու դեպքում՝ վերադարձ փուլ 2 - ին, հակառակ դեպքում՝ անցում փուլ 6-ին,
6. ավարտ:

Այստեղ F_p -ն և F_c -ն նպատակային ֆունկցիայի արժեքներն են համապատասխանաբար նախորդ և ընթացիկ խտրացիաների ընթացքում, իսկ ε -ը նախագծողի կողմից տրվող գործակից է:

Ստորև դիտարկված են ներկայացված փուլերում լուծվող խնդիրները.

1. Մուտքային սերնդի գեներացում: Որպես էվոլյուցիոն ալգորիթմի մուտքային՝ նախնական սերունդ, կարող է հանդիսանալ պատահական ձևով տարրերի դասավորություն ունեցող կամ այլ ալգորիթմով ստացված մատրիցների զանգվածը:

2. Խաչասերում և մուտացիա: Առաջարկվող ալգորիթմում խաչասերման և մուտացիայի փուլերը համատեղված են և հանդիսանում են միևնույն ընթացակարգի երկու հաջորդական բաղադրիչները: Որպես առաջին բաղադրիչ հանդես է գալիս խաչասերման փուլը, որը նպաստում է հաջորդ սերնդի որակի լավացմանը, իսկ որպես երկրորդ բաղադրիչ՝ մուտացիայի փուլը, որը որոշակի պատահականության կիրառմամբ նպաստում է լոկալ օպտիմումից խուսափելուն: Խաչասերման նպատակով, որպես հաջորդ սերնդի ծնող առանձնակներ, կարող են հանդիսանալ այն 2 մատրիցները, որոնց t^* չափսի ենթամատրիցների համար F գործակիցը ամենափոքրն է: Ընտրված մատրիցների համար կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

- հաշվարկվում է բոլոր t^* չափսերի ենթամատրիցների տարրերի գումարը՝ $P_{\Omega_j} = \sum_{i \in \Omega_j} P_i \quad j \in E$,

- հաշվարկված արժեքների հիման վրա ընտրվում են ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի գումարային արժեք ունեցող ենթամատրիցները՝ $\Omega_{max}, \Omega_{min}$,

- կատարվում է Ω_{max} և Ω_{min} մատրիցների համապատասխանաբար ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղում մի մատրիցից մյուսը:

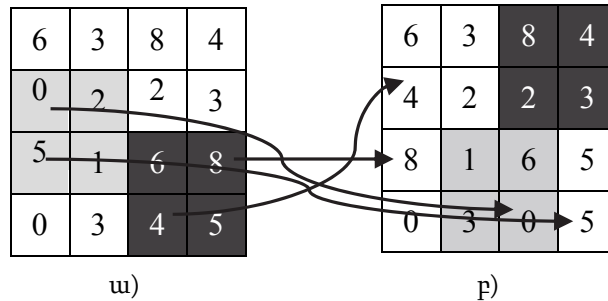
Լոկալ օպտիմումից խուսափելու նպատակով ամենամեծ և ամենափոքր տարրերի փոխատեղումը մի մատրիցից մյուսը կատարվում է ոչ թե անմիջականորեն միմյանց հետ, այլ պատահական ձևով, ինչն էլ հենց հանգեցնում է տեղաբաշխման մուտացիայի: Այդ նպատակով կատարվում են հետևյալ գործողությունները.

- Ω_{max} -ի ամենամեծ էներգասպառում ունեցող տարրը (max) պատահական կերպով տեղափոխվում է Ω_{min} -ի որևէ տարրի տեղը, պայմանով, որ նա չի զբաղեցնի Ω_{min} -ի ամենափոքր էներգասպառում ունեցող տարրի տեղը:

- Համանման գործողությունը կատարվում է նույն Ω_{min} ամենափոքր արժեքով տարրի հետ (min), պայմանով, որ նա չի զբաղեցնի նախորդ կետում տեղափոխված max-ի նախորդ դիրքը:

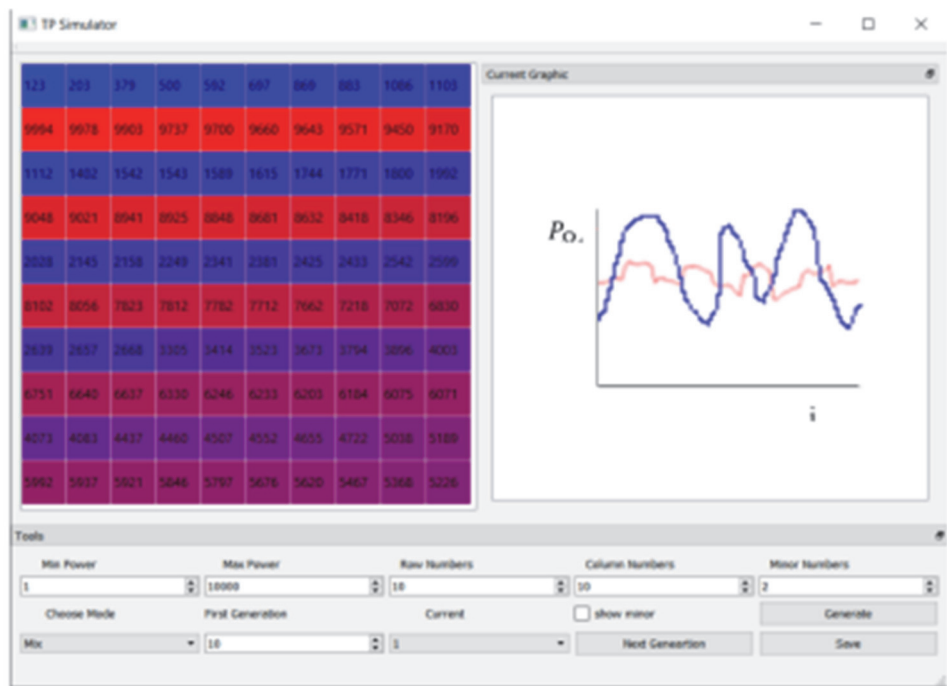
3. Մեկեկցիա: Ստացված նոր մատրիցների սերնդից յուրքանյուրի համար հաշվարկվում է (1) նպատակային ֆունկցիան: Եթե ստացված արժեքը ավելի փոքր է լինում, քան նախորդ սերնդի ծնող մատրիցներից գոնե մեկինը, ապա այդ մատրիցը ավելացվում է հաջորդ սերնդի ծնողային մատրիցների ցուցակում, որում այլևս չի ներառվում նպատակային ֆունկցիայի առավել մեծ արժեք ունեցող մատրիցը:

Ալգորիթմի աշխատանքի մեկ իտերացիան բերված է նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Էվոլյուցիոն ալգորիթմի մեկ քայլը՝
 ω -բաց գույնով նշված է $\Omega_{\min}$, մուգ գույնով՝ $\Omega_{\max}$ - մատրիցի վիճակը մեկ իտերացիայից
 հետո

Հետազոտության արդյունքները: Մշակված ալգորիթմի հետազոտության համար առաջարկվել և իրագործվել է հետազոտական ծրագիր: Ծրագրի աշխատանքային պատուհանը ներկայացված է նկ.2-ում: Մշակված ծրագրի նպատակն է ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմի արդյունավետության հետազոտումը՝ կախված դիտարկվող մատրիցի չափից, լոկալ ենթամատրիցների չափից և իտերացիաների քանակից:



Նկ. 2. Տեղաբաշխման ծրագրային միջոցի աշխատանքային պատուհանը

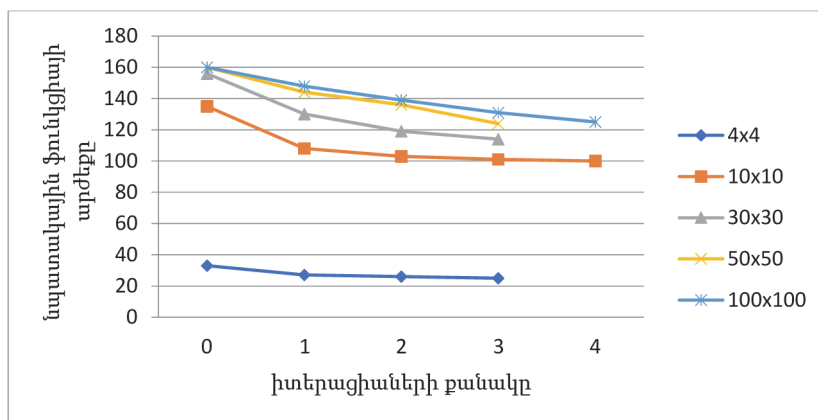
Մշակված ծրագրային միջոցի ինտերֆեյսը բաղկացած է երեք հիմնական աշխատանքային տիրույթներից: Քանի որ ծրագրային միջոցի նպատակն է հետազոտել մշակված ալգորիթմը, ապա նրա գործիքների շարքում ընդգրկվել են կամայական թվերի գեներատորի մուտքին փոխանցվող պարամետրերի ընտրման միջոցներ և գեներտիկ ալգորիթմի մուտքային պարամետրերի փոխանցման միջոցներ, որոնք տեղակայված են **“Tools”** հատվածում: Դրանց հիման վրա ծրագրային միջոցը գեներացնում է կամայական տեղաբաշխմամբ մուտքային սերունդը: **“Current Graphic”** տիրույթում ներկայացված է ընթացիկ պահին աշխատանքային պատուհանի ձախ մասում ցույց տրվող մատրիցի ենթամատրիցների տարրերի գումարների կախվածությունը նրանց ինդեքսներից: Մուգ գույնով ներկայացված է մինչ ալգորիթմի աշխատանքը եղած վիճակը, իսկ բացով՝ ալգորիթմի մի քանի իտերացիաներից հետո ստացված արդյունքը: Ալգորիթմի հետազոտման արդյունքները բերված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Հետազոտական ծրագրի միջոցով ստացված տվյալները

Մուտքային զանգվածի տարրերի էներգասպառ- ման հնարավոր նվազագույն և առավելագույն արժեքները	Մուտաքա- յին սերնդի մատրից- ների քանակը	Մուտքային սերնդի մատրիցի չափսերը	Ենթա- մատ- րիցի չափ- սերը	Յուրաքանչյուր հաջորդ սերնդի գեներացված մատրիցների առավելագույն քանակը	Լավարկման չափանիշի փոփոխու- թյունը սկզբնական և վերջնական սերունդների միջև	Իտերա- ցիա- ների քա- նակը
1-10	10	4x4	2x2	4	33...25	3
1-10	10	10x10	4x4	16	135...100	4
1-10	10	30x30	4x4	16	156...114	3
1-10	10	50x50	4x4	16	160...124	3
1-10	10	100x100	4x4	16	158...118	3

Ինչպես երևում է աղ. 1-ից, մշակված ալգորիթմը 3-4 իտերացիաների արդյունքում լավարկում է մուտքային սերնդի մատրիցների տեղաբաշխումը 23...32%-ով: Նպատակային ֆունկցիայի արժեքի փոփոխությունը հաջորդող իտերացիաների ընթացքում բերված է նկ. 3-ում:



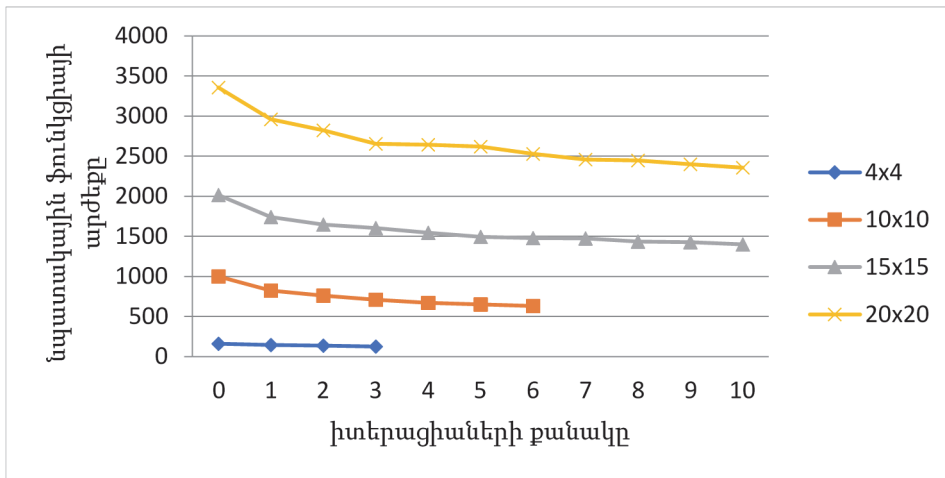
Նկ. 3. Նպատակային ֆունկցիայի փոփոխությունը իտերացիաների ընթացքում տարբեր չափսերի մատրիցների դեպքում

Ինչպես երևում է գրաֆիկներից, նպատակային ֆունկցիայի արժեքը կայունանում է 3...4 իտերացիայից հետո՝ անկախ մատրիցների չափսերից: Կատարվել են նաև փորձարկումներ՝ պահպանելով մուտքային մատրիցի չափսերը և տվյալների բազմությունը, փոփոխելով ենթամատրիցների չափսերը: Փորձարկումները կատարվել են 50x50 չափսի մատրիցի վրա, արդյունքները պատկերված են նկ.4-ում և աղ.2-ում:

Աղյուսակ 2

Հետազոտական ծրագրի միջոցով ստացված տվյալները 50x50 չափսի մատրիցների դեպքում

Մուտքային գանգվածի տարրերի էներգասպառման հնարավոր նվազագույն և առավելագույն արժեքները	Մուտա-քային սերնդի մատրիցների քանակը	Ենթամատրիցի չափսերը	Յուրաքանչյուր հաջորդ սերնդի գենե-րացված մատրիցների առավելագույն քանակը	Լավարկման չափանիշի փոփոխությունը սկզբնական և վերջնական սերունդների միջև	Իտերացիաների քանակը
1-10	10	4x4	16	160...124	3
1-10	10	10x10	100	1000...632	6
1-10	10	15x15	225	2014...1399	10
1-10	10	20x20	400	3357...2357	10



Նկ. 4. Ալգորիթմի իտերացիաների ընթացքը 50x50 չափսի մատրիցների և համապատասխան չափսերի ենթամատրիցների դեպքում

Բերված արդյունքներից երևում է, որ ենթամատրիցների չափսերը մեծացնելու եղանակով հնարավոր է հասնել 30...37% լավարկման:

Եզրակացություն: Առաջարկվել է ԻՄ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխման մեթոդ, որը հիմնված է էվոլյուցիոն ալգորիթմի վրա: Իրագործվել է ծրագրային միջոց, որով հետազոտվել է մշակված ալգորիթմը: Փորձարկումները ցույց են տվել, որ մուտքային մատրիցների համեմատ ելքային մատրիցներում տեղաբաշխումը 23...32% հնարավոր է լավարկել 3...4 իտերացիայից հետո, իսկ միևնույն մատրիցի չափսերի դեպքում ենթամատրիցների չափսերի մեծացմամբ հնարավոր է հասնել 30...37%-ով ավելի լավ արդյունքների: Հետևաբար, կարելի պնդել, որ մշակված ալգորիթմը կատարում է ԻՄ-ի ջերմային դաշտի համահարթեցում: Այն հնարավոր է ներդնել գոյություն ունեցող ԻՄ-երի ավտոմատացված նախագծման համակարգերում՝ որպես նախնական ջերմային տեղաբաշխման ենթահամակարգ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS).- 2010, 2015.
2. Մելիքյան Վ.Շ., Հարությունյան Ա.Գ., Գևորգյան Ա.Ա. Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների ֆիզիկական նախագծման մեթոդներ.- Երևան: Ճարտարագետ, 2015.- 257 էջ:
3. Sherwani N.A. Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Intel Corporation.- Kluwer Academic Publishers, 2007.-572 p.
4. Tsai C.H., Kang S.M. Cell-level placement for improving substrate thermal distribution // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. - 2000. - Vol. 19, №2. -P. 253-266.

5. **Арутюнян А.Г.** Повышение тепловой надежности интегральных схем на этапе размещения элементов // Вестник ГИУА. Серия “Моделирование, оптимизация, управление.”- Ереван, 2008.- Выпуск 11, том 2.- С. 22-34.
6. **Lee K.K., Paradise E.J., Lim S.K.** Thermal-driven Circuit Partitioning and Floorplanning with Power Optimization // Georgia Institute of Technology by KK Lee. - 2003. -P. 7.
7. **Chu C.C.N., Wong D.F.** A Matrix Synthesis Approach to Thermal Placement // IEEE Trans on Comp.- Aided Design.- Nov. 1998.- VOL.17, No.11. – P. 1166-1174.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22. 02. 2018:

Т.А. ГАСПАРЯН

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА
НАЧАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Предложен метод теплового размещения логических ячеек комбинационных схем, основанный на эволюционных алгоритмах. Разработан программный инструмент для исследования эволюционного алгоритма размещения, реализация которого продемонстрировала эффективность предложенного метода с точки зрения выравнивания теплового поля.

Ключевые слова: интегральная схема, тепловое размещение, эволюционный алгоритм.

T.A. GASPARYAN

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF EVOLUTION ALGORITHM FOR THE
INITIAL THERMAL PLACEMENT OF INTEGRATED CIRCUIT CELLS**

A method for the initial placement of cells of integrated circuits based on the evolution algorithms is proposed. A software tool has been developed for investigating the placement evolution algorithm, the implementation of which has demonstrated the effectiveness of the proposed method in terms of leveling the heat field.

Keywords: integrated circuit, thermal placement, evolution algorithm.

С.О. СИМОНЯН, Г.В. АДАМЯН, А.В. МЕЛИКЯН

**МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КУБИЧЕСКИХ
МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ (II)**
(Декомпозиционный подход)

Рассмотрены однопараметрические кубические матричные уравнения, для решения которых предложены декомпозиционные аналитический, а также последовательный и параллельный численно-аналитические методы. Аналитический метод служит основой для разработки численно-аналитических методов, базирующихся на дифференциальных преобразованиях. Для всех методов получены соответствующие условия разрешимости задачи.

Ключевые слова: однопараметрические кубические матричные уравнения, декомпозиционные аналитический и численно-аналитические методы решения, условия разрешимости задачи, современные средства информационных технологий.

Введение. В работе [1] были предложены прямые аналитический, а также последовательный и параллельный численно-аналитические методы решения однопараметрических кубических матричных уравнений

$$A_0(t) \cdot X^3(t) + A_1(t) \cdot X^2(t) + A_2(t) \cdot X(t) + A_3(t) = [0], \quad (1)$$

где $A_0(t)$, $A_1(t)$, $A_2(t)$, $A_3(t)$ - однопараметрические квадратные матрицы порядка m , а $X(t)$ - неизвестная однопараметрическая квадратная матрица также порядка m , подлежащая определению. Проблемы, связанные как с вычислительными схемами решения степенных матричных уравнений вообще, так и с определением количеств этих решений в каждом конкретном случае в частности, достаточно хорошо известны (см., напр. [2-8]).

В настоящей работе рассматриваются декомпозиционные методы решения однопараметрических кубических матричных уравнений (1).

Математический аппарат

1. Аналитический метод решения. Однопараметрическое кубическое матричное уравнение (1) представим в виде эквивалентной матричной системы второго порядка

$$\begin{cases} A_0(t) \cdot X(t) \cdot Y(t) + A_1(t) \cdot Y(t) + A_2(t) \cdot X(t) + A_3(t) = [0] \\ X^2(t) - Y(t) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

и допустим, что функциональные матрицы, входящие в (2), комплексные, т.е.

$$A_0(t) = B_0(t) + j \cdot C_0(t) , \quad (3)$$

$$A_1(t) = B_1(t) + j \cdot C_1(t) , \quad (4)$$

$$A_2(t) = B_2(t) + j \cdot C_2(t) , \quad (5)$$

$$A_3(t) = B_3(t) + j \cdot C_3(t) , \quad (6)$$

$$X(t) = M(t) + j \cdot N(t) , \quad (7)$$

$$Y(t) = P(t) + j \cdot Q(t) . \quad (8)$$

Тогда из первого уравнения системы (2) получим следующую подсистему:

$$\begin{cases} B_0(t) \cdot M(t) \cdot P(t) - C_0(t) \cdot N(t) \cdot P(t) - B_0(t) \cdot N(t) \cdot Q(t) - C_0(t) \cdot M(t) \cdot Q(t) + \\ + B_1(t) \cdot P(t) - C_1(t) \cdot Q(t) + B_2(t) \cdot M(t) - C_2(t) \cdot N(t) + B_3(t) = 0, \\ B_0(t) \cdot M(t) \cdot Q(t) - C_0(t) \cdot N(t) \cdot Q(t) + B_0(t) \cdot N(t) \cdot P(t) - C_0(t) \cdot M(t) \cdot P(t) + \\ + C_1(t) \cdot P(t) + B_1(t) \cdot Q(t) + C_2(t) \cdot M(t) + B_2(t) \cdot N(t) + C_3(t) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

а из второго уравнения - подсистему

$$\begin{cases} M^2(t) - N^2(t) - P(t) = 0, \\ M(t) \cdot N(t) + N(t) \cdot M(t) - Q(t) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Объединив подсистемы (9) и (10) в одно целое, получим гиперматрично-гипервекторно-блочную систему

$$\begin{bmatrix} B_2(t) - C_2(t) & U(t) - V(t) \\ C_2(t) & B_2(t) & V(t) & U(t) \\ M(t) & -N(t) & & \\ N(t) & M(t) & & -E \end{bmatrix}_{4m \times 4m} \cdot \begin{bmatrix} M(t) \\ N(t) \\ P(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}_{4m \times m} = - \begin{bmatrix} B_3(t) \\ C_3(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4m \times m}, \quad (11)$$

где

$$\begin{cases} U(t) = B_1(t) + B_0(t) \cdot M(t) - C_0(t) \cdot N(t) , \\ V(t) = C_1(t) + C_0(t) \cdot M(t) + B_0(t) \cdot N(t) , \end{cases} \quad (12)$$

а E – единичная матрица порядка $2m$.

Гиперматрично-гипервекторно-блочная система (11) в комплексной записи имеет вид

$$\begin{matrix} \mathcal{D}(t) & \cdot & R(t) & = & - & S(t) \\ 4m \times 4m & & 4m \times m & & & 4m \times m \end{matrix} \quad (13)$$

где $R(t) = \begin{pmatrix} M^T(t) & N^T(t) \\ P^T(t) & Q^T(t) \end{pmatrix}^T$, $S(t) = \begin{pmatrix} B_3^T(t) & C_3^T(t) \\ 0^T & 0^T \end{pmatrix}^T$.

Из последнего представления при выполнении условия гиперрегулярности (условия разрешимости)

$$\text{rang} \mathcal{D}(t) = 4m \quad (14)$$

получим итерационную вычислительную схему

$$R(t)_{(q+1)} = \mathcal{D}^{-1}(t)_{(q)} \cdot S(t) \quad , \quad (15)$$

или итерационную вычислительную схему ньютоновского типа

$$R(t)_{(q+1)} = \frac{1}{2} \cdot [R(t)_{(q)} - \mathcal{D}^{-1}(t)_{(q)} \cdot S(t)] \quad (16)$$

2. Декомпозиционные численно-аналитические методы решения.

Теперь рассмотрим применение дифференциальных преобразований для решения гиперматрично-гипервекторно-блочной системы (11). При этом допустим, что для всех матричных элементов этой системы имеют место следующие дифференциальные преобразования [9]:

$$B_0(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K B_0(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad B_0(t) = \mathfrak{B}_0(t, t_v, H, B_0(K)) \quad , \quad (17)$$

$$B_1(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K B_1(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad B_1(t) = \mathfrak{B}_1(t, t_v, H, B_1(K)) \quad , \quad (18)$$

$$B_2(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K B_2(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad B_2(t) = \mathfrak{B}_2(t, t_v, H, B_2(K)) \quad , \quad (19)$$

$$B_3(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K B_3(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad B_3(t) = \mathfrak{B}_3(t, t_v, H, B_3(K)) \quad , \quad (20)$$

$$C_0(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C_0(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad C_0(t) = \mathfrak{B}_4(t, t_v, H, C_0(K)) \quad , \quad (21)$$

$$C_1(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C_1(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad C_1(t) = \mathfrak{B}_5(t, t_v, H, C_1(K)) \quad , \quad (22)$$

$$C_2(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C_2(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad C_2(t) = \mathfrak{A}_6(t, t_v, H, C_2(K)) \quad , \quad (23)$$

$$C_3(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K C_3(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad C_3(t) = \mathfrak{A}_7(t, t_v, H, C_3(K)) \quad , \quad (24)$$

$$M(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K M(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad M(t) = \mathfrak{A}_8(t, t_v, H, M(K)) \quad , \quad (25)$$

$$N(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K N(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad N(t) = \mathfrak{A}_9(t, t_v, H, N(K)) \quad , \quad (26)$$

$$P(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K P(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad P(t) = \mathfrak{A}_{10}(t, t_v, H, P(K)) \quad , \quad (27)$$

$$Q(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K Q(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v} \quad \overline{\cdot} \quad Q(t) = \mathfrak{A}_{11}(t, t_v, H, Q(K)) \quad , \quad (28)$$

где $B_0(K)$, $B_1(K)$, $B_2(K)$, $B_3(K)$, $C_0(K)$, $C_1(K)$, $C_2(K)$, $C_3(K)$, $M(K)$, $N(K)$, $P(K)$, $Q(K)$ - матричные дискреты однопараметрических матриц $B_0(t)$, $B_1(t)$, $B_2(t)$, $B_3(t)$, $C_0(t)$, $C_1(t)$, $C_2(t)$, $C_3(t)$, $M(t)$, $N(t)$, $P(t)$, $Q(t)$ соответственно; H - масштабный коэффициент; $K = \overline{0, \infty}$ - целочисленный аргумент; t_v - центр аппроксимации; $\mathfrak{A}_0(\bullet)$ - $\mathfrak{A}_{11}(\bullet)$ - аппроксимирующие функции, восстанавливающие матрицы-оригиналы $B_0(t)$, $B_1(t)$, $B_2(t)$, $B_3(t)$, $C_0(t)$, $C_1(t)$, $C_2(t)$, $C_3(t)$, $M(t)$, $N(t)$, $P(t)$, $Q(t)$ соответственно.

Итак, с учетом (17)-(28) гиперматрично-гипервекторно-блочную систему (11) из области оригиналов переведем в область дифференциальных изображений, имея в виду, что гиперматрично-блочные дискреты равны

$$D(l) = \left[\begin{array}{cc|cc} B_2(l) - C_2(l) & & U(l) - V(l) & \\ C_2(l) & B_2(l) & V(l) & U(l) \\ \hline M(l) & -N(l) & & \\ N(l) & M(l) & -E \cdot \delta(l) & \end{array} \right], \quad l = \overline{0, K}, \quad (29)$$

причем $\delta(l)$ - тейлоровская единица [9], блоки-матрицы

$$\begin{cases} U(l) = B_1(l) + \sum_{l=0}^K B_0(l) \cdot M(K-l) - \sum_{l=0}^K C_0(l) \cdot N(K-l) , \\ V(l) = C_1(l) + \sum_{l=0}^K C_0(l) \cdot M(K-l) + \sum_{l=0}^K B_0(l) \cdot N(K-l) , \end{cases} \quad l = \overline{0, K}, \quad (30)$$

а гипервекторно-блочные дискретизации:

$$R(l) = \begin{bmatrix} M(l) \\ N(l) \\ P(l) \\ Q(l) \end{bmatrix}, \quad l = \overline{0, K}; \quad S(l) = \begin{bmatrix} B_3(l) \\ C_3(l) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad l = \overline{0, K}. \quad (31)$$

а) Последовательные рекуррентные итерационные вычислительные схемы

Итак, с учетом (17) имеем:

при $K=0$:

$$\underset{4m \times 4m}{D(0)} \cdot \underset{4m \times m}{R(0)} = - \underset{4m \times m}{S(0)}, \quad (32)$$

откуда

$$R(0)_{(q+1)} = -D^{-1}(0)_{(q)} \cdot S(0) \quad (33)$$

или

$$R(0)_{(q+1)} = \frac{1}{2} \cdot [R(0)_{(q)} - D^{-1}(0)_{(q)} \cdot S(0)], \quad (34)$$

если, конечно, имеют место условия полноранговости матриц $D(0)_{(q)}$ или условия гиперрегулярности (условия разрешимости)

$$\text{rang} D(0)_{(q)} = 4m, \quad \forall q; \quad (35)$$

при $K \geq 1$:

$$D(0) \cdot R(K) + D(1) \cdot R(K-1) + \dots + D(K-1) \cdot R(1) + D(K) \cdot R(0) = -S(K), \quad (36)$$

откуда

$$R(K)_{(q+1)} = -D^{-1}(0) \cdot \left[D_1(K)_{(q)} \cdot R(0) + \sum_{l=1}^{K-1} D(l) \cdot R(K-l) + S(K) \right] \quad (37)$$

или

$$R(K)_{(q+1)} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ R(K)_q - D^{-1}(0) \cdot \left[D_1(K)_{(q)} \cdot R(0) + \sum_{l=1}^{K-1} D(l) \cdot R(K-l) + S(K) \right] \right\}. \quad (38)$$

б) Параллельные итерационные вычислительные схемы

Объединив (32) и соотношения, порождаемые из (36) при изменении целочисленного аргумента $K = \overline{1, \infty}$, получим следующее суперматрично-супервекторно-блочное представление:

$$\begin{bmatrix} D(0) & 0 & \cdots & 0 \\ D(1) & D(0) & \cdots & 0 \\ D(2) & D(1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(K) & D(K-1) & \cdots & D(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(0) \\ R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(0) \\ S(1) \\ S(2) \\ \vdots \\ S(K) \end{bmatrix}, \quad (39)$$

$4(K+1) \cdot m \times 4 \cdot (K+1) \cdot m \quad 4(K+1) \cdot m \times m \quad 4(K+1) \cdot m \times m$

откуда с учетом условий суперрегулярности (условий разрешимости) будем иметь

$$\begin{bmatrix} R(0) \\ R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(K) \end{bmatrix}_{(q+1)} = - \begin{bmatrix} D(0) & 0 & \cdots & 0 \\ D(1) & D(0) & \cdots & 0 \\ D(2) & D(1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(K) & D(K-1) & \cdots & D(0) \end{bmatrix}_{(q)}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S(0) \\ S(1) \\ S(2) \\ \vdots \\ S(K) \end{bmatrix} \quad (40)$$

или в компактной записи:

$$D(\bullet) \cdot R(\bullet) = -S(\bullet), \quad (41)$$

откуда

$$R(\bullet)_{(q+1)} = -D^{-1}(\bullet)_{(q)} \cdot S(\bullet), \quad (42)$$

либо

$$R(\bullet)_{(q+1)} = \frac{1}{2} \cdot [R(\bullet)_{(q)} - D^{-1}(\bullet)_{(q)} \cdot S(\bullet)]. \quad (43)$$

Естественно, из условий гиперрегулярности (35) из-за нижнетреугольной структуры суперматрицы $D(\bullet)$ немедленно следуют и условия суперрегулярности (условия разрешимости):

$$\text{rang} D(\bullet)_{(q)} = 4 \cdot (K + 1) \cdot m, \quad \forall q. \quad (44)$$

Замечание 1. Несмотря на то, что гиперматрично-гипервекторно-блочная система (3) из работы [1] и гиперматрично-блочная система (11) настоящей работы структурно полностью идентичны, однако содержательно они достаточно различны, ибо:

- гиперматрица $D(t)$ из работы [1] в общем случае комплексная, а гиперматрица $D(t)$ настоящей работы действительная;

- блоки гиперматрицы $D(t)$ (кроме единичной матрицы E), очевидно, являются блочно-кососимметрическими относительно соответствующих первых главных диагоналей и блочно-симметрическими относительно соответствующих вторых главных диагоналей, между тем гиперматрица $D(t)$ такими свойствами не обладает.

Замечание 2. Свойства блочной кососимметричности и блочной симметричности, естественно, сохраняются и для всех гиперматрично-блочных дискретов $D(l)$, $\forall l = \overline{0, K}$.

Заключение. Итак, организовав вычислительные процедуры (33), (37) или (34), (38) при последовательной рекуррентной итерационной вычислительной схеме, а также процедуры (42) или (43) при параллельной итерационной вычислительной схеме и определив гипервекторно-блочные дискреты $R(l)$, $\forall l = \overline{0, K}$, далее в соответствии с (25)-(28) можно определить матрицы $M(t)$, $N(t)$, $P(t)$ и $Q(t)$, а затем в соответствии с (7) и (8) - и неизвестные матрицы $X(t)$ и $Y(t)$.

Очевидно также, что предложенные вычислительные схемы могут быть эффективно реализованы средствами современных информационных технологий [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонян С.О., Адамян Г.В., Меликян А.В. Методы решения однопараметрических кубических матричных уравнений (I) (Прямой подход) // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2017.- Т. LXX, №4. – С 482 – 490.
2. Гельфанд С.И. О числе решений квадратного уравнения // Журнал “Глобус-1”. – 2000. – С. 124-134.
3. Козлов В.В. Ограничения квадратичных форм на лагранжевы плоскости, квадратные матричные уравнения и гироскопическая стабилизация // Функциональный анализ и его приложения. – 2005. - Вып. 4, т. 39. – С. 32-47.

4. **Палин В.В.** О разрешимости квадратных матричных уравнений // Вестник Московского государственного университета. Серия 1: Математика, механика. – 2008. - №6. – С. 36-41.
5. **Симонян С.О.** К решению однопараметрических квадратных матричных уравнений // Вестник ИАА. –2016. - Т. 13, №4. – С. 463-471.
6. **Симонян С.О.** Гиперматрично-блочный численно-аналитический метод решения однопараметрических квадратных матричных уравнений // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. – 2016.- Т. LXIX, №4. – С. 422-430.
7. **Симонян С.О.** Метод решения однопараметрических обобщенных квадратных матричных уравнений // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2016, №2. – С. 12-23.
8. **Симонян С.О.** Декомпозиционные гиперматрично-блочные численно-аналитические методы решения однопараметрических квадратных матричных уравнений // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - 2017.- Т. LXX, №1. – С. 95-108.
9. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1984.- 420 с
10. **Strastrup B.** The C++ Programming Language. - 4th Edition. - Boston: Addison – Wesley professional, 2013. – 1368 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 06.09.2017.

Մ.Հ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ, Գ.Վ. ԱՂԱՍՅԱՆ, Ա.Վ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ

**ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԽՈՐԱՆԱՐԴ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ
ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ (I)
(Ղեկմպոզիցիոն մոտեցում)**

Դիտարկված են միապարամետրական խորանարդ մատրիցային հավասարումները, որոնց լուծման համար առաջարկված են ղեկմպոզիցիոն անալիտիկ, ինչպես նաև հաջորդական և զուգահեռ թվա-անալիտիկ եղանակներ: Անալիտիկ եղանակը հիմք է ծառայում թվա-անալիտիկ եղանակների մշակման համար, որոնք հիմնված են դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա: Բոլոր եղանակների համար էլ ստացված են խնդրի լուծելիության համապատասխան պայմանները:

Առանցքային բառեր. միապարամետրական խորանարդ մատրիցային հավասարումներ, ղեկմպոզիցիոն անալիտիկ և թվա-անալիտիկ եղանակներ, խնդրի լուծելիության պայմաններ, տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից միջոցներ:

S.H. SIMONYAN, G.V ADAMYAN, A.V. MELIKYAN

**METHODS OF SOLVING ONE-PARAMETER CUBIC MATRIX EQUATIONS
(Decomposition approach)**

One-parameter cubic matrix equations are considered for whose solution decomposition analytical, as well as serial and parallel numerical- analytical methods are proposed. The analytical method serves as a basis for the development of numerical and analytical methods based on the differential transformations. Appropriate conditions for solvability of the problem are obtained for all the methods.

Keywords: one-parametric cubic matrix equations, decomposition analytical and numerical-analytical methods of solution, conditions for solvability of the problem, the modern means of information technology.

УДК 621.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Т.Р. МЕЛКОНЯН, Г.С. СУКИАСЯН

О КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДВУМЕРНОЙ
ФУНКЦИИ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТКОЙ

Предложен алгоритм автоматического построения кусочно-линейной аппроксимации двумерной непрерывной функции с нерегулярной сеткой. Алгоритм минимизирует погрешность аппроксимации при заданном числе сеточных узлов. Разработанный подход апробирован на модели двумерной параболической функции.

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

Введение. При численном решении нелинейных задач методом конечных элементов на сходимость процесса последовательных приближений сильное влияние оказывает количество узлов треугольной сетки. Это вызывает потребность в построении “экономных” аппроксимаций, требующих малого количества сеточных узлов при сохранении достаточной точности приближений. Стремление уменьшить число сеточных узлов приводит к необходимости перехода от общепринятых равномерных решеток к нерегулярным сеткам (см. [1–5]). Отметим, что в прошлом веке использовались исключительно регулярные решетки (см. [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 отрицательное влияние оказывает наличие тупых углов у треугольников сетки.

В [2] был предложен алгоритм автоматического построения кусочно-линейной аппроксимации с неравномерной решеткой для одномерной функции. Алгоритм минимизировал погрешность аппроксимации при заданном числе точек решетки. В настоящей работе одномерный алгоритм, предложенный в [2], обобщен для двумерного случая.

Экономные аппроксимации. Пусть на прямоугольнике $[a,b] \times [c,d]$ задана двумерная непрерывная функция $z=F(x,y)$. В [1] были изучены приближения $F_\varepsilon(x,y)$ функции $F(x,y)$, “экономные” в следующем смысле:

1. $|F(x,y)-F_\varepsilon(x,y)|<\varepsilon$ при заданном уровне точности ε и всех x,y из области $[a,b] \times [c,d]$.

2. $F_\varepsilon(x,y)$ является кусочно-линейной функцией; ее график состоит из плоских треугольников, проекции которых на плоскость OXY составляют треугольную сетку.

3. Количество узлов сетки (т.е. число вершин всех треугольников) минимально в следующем смысле: если удалить любой узел сетки, то нарушится условие 1.

Таким образом, в [1] была решена задача минимизации количества сеточных узлов при заданном уровне точности.

В настоящей работе исследуется дуальная задача: минимизировать погрешность аппроксимации при заданном числе сеточных узлов.

Ниже предлагается алгоритм построения кусочно-линейной аппроксимации методом последовательных приближений. Алгоритм является двумерным обобщением одномерного алгоритма, изученного в [2], и основан на переходе от решеток к сеткам Делоне.

Сетки Делоне. Напомним определение триангуляции Делоне (см. [8]). 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 [8] доказано, что для любого конечного множества точек M_k можно построить сетку $D(M_k)$ (иногда не единственным образом).

Индуктивный алгоритм. Предлагается следующий индуктивный алгоритм построения последовательности узлов $M_k = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ и соответствующей сетки $D(M_k)$.

На прямоугольнике $[a,b] \times [c,d]$ рассмотрим первичное множество узлов M_4 , состоящее из четырех вершин: $P_1=(a,c)$, $P_2=(b,c)$, $P_3=(b,d)$, $P_4=(a,d)$, и первичную сетку S_4 , состоящую из двух треугольников: $\Delta P_1P_2P_3$ и $\Delta P_1P_3P_4$. Отметим, что сетка S_4 является сеткой Делоне с четырьмя узлами $P_1, \dots, P_4$, т.е. $S_4 = D(M_4)$.

Предположим, что множество узлов $M_{k-1} = \{P_1, P_2, \dots, P_{k-1}\}$ и соответствующая сетка Делоне $S_{k-1} = D(M_{k-1})$ уже построены. Построим очередную точку P_k следующим образом.

Два узла P_i и P_j называем соседними и обозначаем $P_i \sim P_j$, если они являются концами стороны какого-нибудь треугольника сетки. У первичной сетки S_4 все пары узлов являются соседними, кроме пары P_2 и P_4 . Обозначим через $R(S_{k-1})$ множество ребер сетки S_{k-1} , т.е.

$$R(S_{k-1}) = \{(P_i, P_j) : P_i \sim P_j\}.$$

Для каждого ребра из $R(S_{k-1})$ с вершинами P_i, P_j вычисляются значения разностей $|z_i - z_j|$, где $z_i = F(x_i, y_i)$, $z_j = F(x_j, y_j)$, а (x_i, y_i) , (x_j, y_j) – декартовы координаты вершин P_i и P_j соответственно.

Затем находим то ребро из $R(S_{k-1})$, которое дает максимальную разность значений $|z_i - z_j|$. В середине этого ребра добавим новый узел – это и есть искомый узел P_k .

Будем продолжать добавлять узлы делением пополам ребра P_i, P_j , соответствующего наибольшему из значений разностей $|z_i - z_j|$, до тех пор, пока количество узлов не достигнет заданного значения n .

Обозначим через $F_{Mn}(x, y)$ следующее приближение к функции $F(x, y)$. Приближение $F_{Mn}(x, y)$ является кусочно-линейной функцией, ее график состоит из плоских треугольников, проекции которых на плоскость OXY составляют треугольную сетку Делоне $S_n = D(M_n)$ с системой узлов M_n . Заметим, что число узлов этой сетки равно фиксированному числу n .

Обозначим через E_{Mn} погрешность аппроксимации F_{Mn} :

$$E_{Mn} = \max_{\{a < x < b, c < y < d\}} |F(x, y) - F_{Mn}(x, y)|.$$

Погрешность E_{Mn} можно оценить при помощи наибольшей разности E_{Sn} значений функции $F(x, y)$ в узлах сетки S_n :

$$E_{Sn} = \max_{\{P_i \sim P_j\}} |z_i - z_j|,$$

где $z_i = F(x_i, y_i)$, а максимум берется по всем парам соседних узлов сетки S_n .

Разумеется, погрешность E_{Mn} зависит не только от вида функции $F(x, y)$, но и от выбора точечного множества M_n . Наша цель – для данной функции $F(x, y)$ и заданного числа узлов n так построить точечное множество M_n , чтобы погрешность E_{Mn} была как можно меньше.

Легко видеть, что для предложенного алгоритма последовательность E_{Sn} монотонно убывает с ростом числа узлов n . Так как для гладких функций $F(x, y)$ при достаточно больших n имеем $E_{Mn} \cong E_{Sn}$, то можно ожидать, что предложенный алгоритм приведет к малой погрешности аппроксимации E_{Mn} .

Численные результаты. На рис. 1 представлен пример аппроксимации $F_{Mn}(x,y)$ 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.

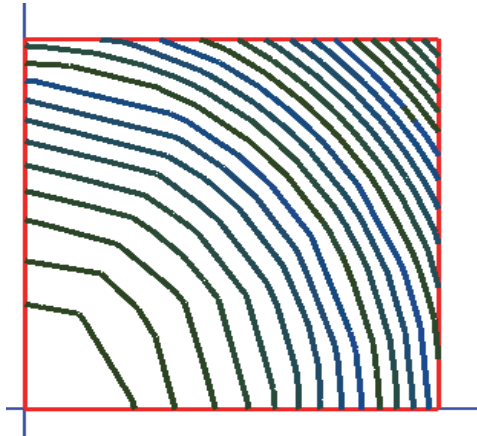


Рис. 1. Линии уровня аппроксимации F_{Mn}

На рис. 2 представлена соответствующая треугольная сетка Делоне, получающаяся предложенным алгоритмом при аппроксимации поля, с линиями уровня, изображенными на рис. 1.

Как видно из рисунка, 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.

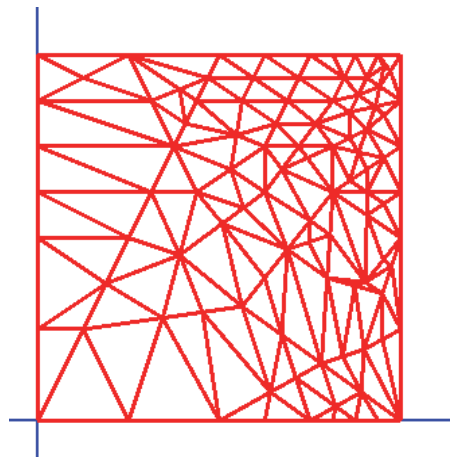


Рис. 2. Соответствующая треугольная сетка Делоне

Наглядно видно, что интенсивность сеточных узлов в разных участках двумерной сетки существенно разная. Четко соблюдается условие: густота сеточных узлов тем больше, чем сильнее меняется функция.

Заключение. Развита и реализована 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. 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.
2. 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. 511-518.
3. 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.
4. Боровиков С.Н. Метод построения нерегулярных тетраэдральных расчетных сеток в произвольных трехмерных областях с криволинейными границами: Дис. ... к.т.н.- М., 2005.- 192 с.
5. 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.
6. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.
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.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.02.2018.

Տ.Ռ. ՄԵԼԻՔՈՆՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ

ՈՉ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐ ՑԱՆՑՈՎ ԵՐԿՉԱՓ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ԿՏՈՐ-ԳԾԱՅԻՆ
ՄՈՏԱՐԿՈՒՄԸ

Առաջարկված է ոչ կանոնավոր ցանցով երկչափ անընդհատ ֆունկցիայի կտոր-
գծային մոտարկման ավտոմատ կառուցման ալգորիթմ: Ալգորիթմը մինիմալացնում է
մոտարկման սխալանքը ցանցային հանգույցների տրված քանակի դեպքում: Զարգացված
մոտեցումը կիրառված է երկչափ պարաբոլային ֆունկցիայի մոդելի վրա:

Առանցքային բառեր. կտոր-գծային մոտարկում, ոչ կանոնավոր ցանց, Դելոնեյի
եռանկյունապատում:

T.R. MELKONYAN, H.S. SUKIASYAN

THE DIMENSIONAL-LINEAR APPROXIMATION OF TWO-DIMENSIONAL
FUNCTION WITH A NON-REGULAR NET

An algorithm for automatic construction of a piecewise linear approximation of a
two-dimensional continuous function with an irregular grid is proposed. The algorithm
minimizes the approximation error for a given number of mesh nodes. The developed
approach is tested on the model of a two-dimensional parabolic function.

Keywords: piecewise-linear approximation, irregular lattice, Delaunay triangulation.

Ս.Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Մ.Կ. ԴԱՐԱԽՉՅԱՆ

**ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻԱԶԱՓ ՎԱՐԻԱՑԻՈՆ ՀԱՇՎԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ
ՎԱՐԻԱՑԻԱՅԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵԶՐԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ**

Մշակվել են օպտիմալ կառավարման միաչափ վարիացիոն հաշվի խնդիրների վարիացիայի հավասարումներում անհայտ ֆունկցիաների եզրային պայմանները: Ստացված արդյունքների հիման վրա կարելի է լուծել վարիացիայի հավասարումները և գնահատել որակի ֆունկցիոնալի (ՈՖ) փոփոխությունները կառավարման նպատակի պարամետրերի փոփոխությունների դեպքում: Բերված է թվային օրինակ:

Առանցքային բառեր. օպտիմալ կառավարում, վարիացիա, Էյլերի հավասարում, եզրային պայմաններ, Թեյլորի շարք:

Ներածություն: Օպտիմալ կառավարման համակարգերում արտաքին գործոնների ազդեցության հետևանքով կարող են ի հայտ գալ որոշ դինամիկական սխալներ, որոնց հետևանքով կփոխվեն ինչպես կառավարման նպատակի պարամետրերը, այլ կերպ ասած՝ եզրային պայմանները (ԵՊ), այնպես էլ ՈՖ-ի արժեքը: Համակարգերի նախագծման և վերլուծության աշխատանքներում ՈՖ-ի փոփոխության գնահատման խնդիրն ունի գործնական նշանակություն [1]: Նշված խնդիրն անփոփոխ ԵՊ-ների դեպքում բավարար չափով պարզաբանված է [2, 3], սակայն այն փոփոխվող ԵՊ-ների դեպքում, թվային մեթոդներով մշակվող միաչափ վարիացիոն հաշվի խնդիրներում, լուծված է Պուասոնի կոդմից [2] Թեյլորի շարքի առաջին անդամի մոտավորությամբ: ՈՖ-ի փոփոխության ավելի բարձր ճշտությամբ գնահատման խնդիրը կախված է Էյլերի վարիացիայի հավասարումների լուծումից [4], որոնց ԵՊ-ների մշակմանն էլ նվիրված է սույն աշխատանքը:

Եզրային պայմանների մշակումը: Պարզագույն վարիացիոն հաշվի հետևյալ խնդրում՝

$$I = \int_{t_0}^t F(y(\tau), \dot{y}(\tau), \tau) d\tau \rightarrow \min_y (\max), \quad (1)$$

$$y(t_0) = y_0; \quad y(t) = y_t \quad (2)$$

Էյլերի հավասարմանը բավարարող էքստրեմալի $y = y_1(\tau, C_1, C_2)$ ինտեգրման C_1 և C_2 հաստատունները որոշվում են եզրային (2) պայմաններից: Արդյունքում կունենանք՝

$$y = y(\tau, t_0, y_0, t, y_t), \quad (3)$$

որը բավարարում է հետևյալ պայմաններին.

$$y(\tau, t_0, y_0, t, y_t)_{\tau=t} = y_t = y(t), \quad (4)$$

$$y(\tau, t_0, y_0, t, y_t)_{\tau=t_0} = y_0 = y(t_0): \quad (5)$$

Պարզության համար նպատակահարմար է (3) էքստրեմալը ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$\begin{aligned} y &= y(\tau, x), \\ x &\in \Gamma = (t_0, y_0, t, y_t), \end{aligned} \quad (6)$$

որտեղ Γ -ն արգումենտի և ֆունկցիայի եզրային արժեքների բազմությունն է: ԵՊ-ների նկատմամբ էյլերի առաջին աստիճանի վարիացիայի հավասարումները նկարագրվում են երկրորդ կարգի դիֆերենցիալ հավասարումներով [5]՝

$$(F_{yy} - \frac{d}{d\tau} F_{y\dot{y}}) \cdot \frac{\partial y(\tau, x)}{\partial x} - \frac{d}{d\tau} F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \frac{\partial \dot{y}(\tau, x)}{\partial x} - F_{\dot{y}\dot{y}} \cdot \frac{\partial \ddot{y}(\tau, x)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

որտեղ $\dot{y}(\tau, x) = \partial y / \partial \tau = dy / d\tau$: Ենթադրվում է, որ հայտնի է ինչպես y էքստրեմալը, այնպես էլ դրա բարձր կարգի ածանցյալները τ և x արգումենտների նկատմամբ, և խնդիր է դրվում՝ գտնելու $\partial y(\tau, x) / \partial x$ ֆունկցիաների ԵՊ-ները: Այդ ֆունկցիաների ԵՊ-ները և դրանց վերաբերյալ առնչությունները կքննարկվեն կառավարման նպատակի տարբեր x պարամետրերի փոփոխությունների դեպքում:

Դեպք 1: $x = t$: Արգումենտի աջակողմյան եզրի կամայական Δt փոփոխության դեպքում (4)-ից տեղի ունի

$$y(\tau, t + \Delta t)_{\tau=t+\Delta t} = y_t,$$

որի ձախ մասը t արժեքի Δt շրջակայքում Թեյլորի շարքի վերածման արդյունքում կստացվի՝

$$\begin{aligned} y(\tau, t + \Delta t)_{\tau=t+\Delta t} &= y(\tau, t)_{\tau=t} + (\dot{y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial t})_{\tau=t} \cdot \Delta t + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot (\ddot{y} + 2 \cdot \frac{\partial \dot{y}}{\partial t} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2})_{\tau=t} \cdot \Delta t^2 + \alpha(\Delta t^2) = y_t, \end{aligned} \quad (8)$$

որտեղ $\alpha(\Delta t^2)$ -ը շարքի բարձր կարգի անդամների գումարն է: Հաշվի առնելով (4)-ը և այն, որ Δt -ն կամայական է, (8)-ից կհետևի՝

$$\dot{y}(t) = -\frac{\partial y(\tau, t)}{\partial t}\bigg|_{\tau=t}, \quad (9)$$

$$(\ddot{y}(\tau, t) + 2 \cdot \frac{\partial \dot{y}(\tau, t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 y(\tau, t)}{\partial t^2})_{\tau=t} = 0 : \quad (10)$$

Ստացված (9) հավասարումից կարելի է որոշել $\partial y / \partial t$ ֆունկցիայի աջակողմյան եզրային արժեքը, իսկ (10) հավասարումը կապ է հաստատում y ֆունկցիայի երկրորդ կարգի մասնակի ածանցյալների արժեքների միջև:

$\partial y(\tau, t) / \partial t$ ֆունկցիայի ձախակողմյան եզրային պայմանը կարելի է գտնել հետևյալ առնչությունից.

Եթե $y(\tau, t)$ -ն (1) և (2) խնդրի համար թույլատրելի ֆունկցիա է, այդ թվում՝ էքստրեմալ, ապա $\tau = t_0$ արժեքի համար տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\left(\frac{\partial^k y(\tau, t)}{\partial t}\right)_{\tau=t_0} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots : \quad (11)$$

Հիմնավորում: Կամայական Δt փոփոխության դեպքում (5) արտահայտությունից ունենք՝

$$y(\tau, t + \Delta t)_{\tau=t_0} = y_0 : \quad (12)$$

Վերածելով շարքի (12)-ի ձախ մասի արտահայտությունը t -ի Δt շրջակայքում՝

$$y(\tau, t + \Delta t)_{\tau=t_0} = (y(\tau, t) + \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \Delta t + \dots + \frac{1}{k!} \cdot \frac{\partial^k y}{\partial t^k} \cdot \Delta t^k + \dots)_{\tau=t_0} = y_0, \quad (13)$$

և հաշվի առնելով (5) արտահայտությունը և այն, որ Δt կամայական է, (13) արտահայտությունից կունենանք (11) հավասարումների համակարգը:

Դեպք 2: $x = t_0 : \partial y(\tau, t_0) / \partial t_0$ ֆունկցիայի համար տեղի ունի հետևյալ առնչությունը.

Եթե $y(\tau, t_0)$ -ն (1) և (2) խնդրի համար թույլատրելի ֆունկցիա է, այդ թվում՝ էքստրեմալ, ապա $\tau = t_0$ արժեքի համար տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\frac{\partial y(\tau, t_0)}{\partial t_0}\bigg|_{\tau=t_0} = -\dot{y}(\tau, t_0)_{\tau=t_0} = -\dot{y}(t_0), \quad (14)$$

$$(\ddot{y}(\tau, t_0) + 2 \cdot \frac{\partial \dot{y}(\tau, t_0)}{\partial t_0} + \frac{\partial^2 y(\tau, t_0)}{\partial t_0^2})_{\tau=t_0} = 0 : \quad (15)$$

Հիմնավորում: Արգումենտի ձախակողմյան t_0 եզրի կամայական Δt փոփոխության դեպքում (5) արտահայտությունից ունենք՝

$$y(\tau, t_0 + \Delta t)_{\tau=t_0+\Delta t} = y_0,$$

որի ձախ մասը t_0 կետի Δt շրջակայքում ներկայացնելով Թեյլորի շարքով՝

$$\begin{aligned} y(\tau, t_0 + \Delta t)_{\tau=t_0+\Delta t} &= y(\tau, t_0)_{\tau=t_0} + \left(\frac{\partial y(\tau, t_0)}{\partial t_0} + \dot{y}(\tau, t_0) \right)_{\tau=t_0} \cdot \Delta t + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot (\ddot{y}(\tau, t_0) + 2 \cdot \frac{\partial \dot{y}(\tau, t_0)}{\partial t_0} + \frac{\partial^2 y(\tau, t_0)}{\partial t_0^2})_{\tau=t_0} \cdot \Delta t^2 + \alpha(\Delta t^2) = y_0, \end{aligned} \quad (16)$$

և հաշվի առնելով, որ Δt փոփոխությունը կամայական էր, (16) հավասարությունից կհետևեն (14) և (15) պայմանները:

$\partial y(\tau, t_0) / \partial t_0$ ֆունկցիայի աջակողմյան եզրային պայմանը կարելի է գտնել $y(\tau, t_0)$ ֆունկցիայի հետևյալ հատկությունից.

Եթե $y(\tau, t_0)$ -ն (1) և (2) խնդրի համար թույլատրելի ֆունկցիա է, այդ թվում՝ էքստրեմալ, ապա $\tau = t$ արժեքի համար տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\frac{\partial^k y(\tau, t_0)}{\partial t_0^k} \Big|_{\tau=t} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

Հիմնավորում: Արգումենտի ձախակողմյան t_0 արժեքի կամայական Δt փոփոխության դեպքում (4) արտահայտությունից կհետևի՝ $y(\tau, t_0 + \Delta t)_{\tau=t} = y_t$, որի ձախ մասը Թեյլորի շարքով ներկայացման արդյունքում կունենանք՝

$$\begin{aligned} y(\tau, t_0 + \Delta t)_{\tau=t} &= y(\tau, t_0)_{\tau=t} + \left(\frac{\partial y(\tau, t_0)}{\partial t_0} \right)_{\tau=t_0} \cdot \Delta t + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 y(\tau, t_0)}{\partial t_0^2} \right)_{\tau=t} \cdot \Delta t^2 + \dots + \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\partial^k y(\tau, t_0)}{\partial t_0^k} \right)_{\tau=t} \cdot \Delta t^k + \dots = y_t : \end{aligned} \quad (18)$$

Հաշվի առնելով (4)-ը և այն, որ Δt -ն կամայական էր, (18)-ից կստացվեն (17) պայմանները:

Դեպք 3: $x = y_t$: $\partial y(\tau, y_t) / \partial y_t$ ֆունկցիայի աջակողմյան ($\tau = t$) եզրային պայմանները կարելի է որոշել հետևյալ հատկությունից:

Եթե $y(\tau, y_t)$ ֆունկցիան (1) և (2) խնդրի համար էքստրեմալ է, ապա տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\begin{cases} \frac{\partial y(\tau, y_t)}{\partial y_t} \Big|_{\tau=t} = 1, \\ \frac{\partial^k y(\tau, y_t)}{\partial y_t^k} \Big|_{\tau=t} = 0, \quad k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (19)$$

Հիմնավորում: Ֆունկցիայի աջակողմյան y_t եզրի կամայական Δy փոփոխության դեպքում (4)-ից կունենանք՝ $y(\tau, y_t + \Delta y)_{\tau=t} = y_t + \Delta y$, որի ձախ մասը y_t արժեքի Δy շրջակայքում Թեյլորի շարքի վերածելիս կստացվի՝

$$\begin{aligned} y(\tau, y_t + \Delta y)_{\tau=t} &= (y(\tau, y_t) + (\frac{\partial y(\tau, y_t)}{\partial y_t}) \cdot \Delta y + \dots \\ &\dots + \frac{1}{k!} \cdot (\frac{\partial^k y(\tau, y_t)}{\partial y_t^k}) \cdot \Delta y^k + \dots)_{\tau=t} = y_t + \Delta y : \end{aligned}$$

(4) արտահայտության և ստացված հավասարության համադրությունից կհետևի՝

$$\left((\frac{\partial y(\tau, y_t)}{\partial y_t})_{\tau=t_1} - 1 \right) \cdot \Delta y + \dots + \frac{1}{k!} \cdot (\frac{\partial^k y(\tau, y_t)}{\partial y_t^k})_{\tau=t} \cdot \Delta y^k + \dots = 0, \quad (20)$$

որտեղից Δy -ի կամայական լինելու պայմանից կհետևեն (19) եզրային պայմանները:

$\partial y(\tau, y_t) / \partial y_t$ ֆունկցիայի ձախակողմյան ($\tau = t_0$) եզրային արժեքը կորոշվի հետևյալ առնչությունից.

Եթե $y(\tau, y_t)$ ֆունկցիան (1) և (2) խնդրի համար էքստրեմալ է, ապա տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\frac{\partial^k y(\tau, y_t)}{\partial y_t^k} \Big|_{\tau=t_0} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

Հիմնավորում: $y(\tau, y_t)$ ֆունկցիայի աջակողմյան y_t եզրի կամայական Δy փոփոխության դեպքում, համաձայն (5)-ի՝ $y(\tau, y_t + \Delta y)_{\tau=t_0} = y_0$, որի ձախ մասը y_t արժեքի Δy շրջակայքում Թեյլորի շարքով ներկայացման արդյունքում կստացվի՝

$$y(\tau, y_t + \Delta y)_{\tau=t_0} = (y(\tau, y_t) + \dots + \frac{1}{k!} \cdot (\frac{\partial^k y(\tau, y_t)}{\partial y_t^k}) \cdot \Delta y^k + \dots)_{\tau=t_0} = y_0, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

որտեղից, հաշվի առնելով $y(\tau, y_0)_{\tau=t_0} = y_0$ հավասարությունը և այն, որ Δy -ը կամայական էր, կհետևի (21) հավասարությունը:

Դեպք 4: $x = y_0 : \partial y(\tau, y_0)/\partial y_0$ ֆունկցիայի աջակողմյան ($\tau = t$) եզրային պայմանը որոշվում է հետևյալ առնչությունից.

Եթե $y(\tau, y_0)$ ֆունկցիան (1) և (2) խնդրի համար էքստրեմալ է, ապա տեղի ունեն հետևյալ պայմանները.

$$\begin{cases} \frac{\partial y(\tau, y_0)}{\partial y_0} \Big|_{\tau=t_0} = 1, \\ \frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \Big|_{\tau=t_0} = 0, \quad k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (22)$$

Հիմնավորում: $y(\tau, y_0)$ ֆունկցիայի ձախակողմյան y_0 եզրի կամայական Δy փոփոխության դեպքում, համաձայն (5)-ի՝ $y(\tau, y_0 + \Delta y)_{\tau=t_0} = y_0 + \Delta y$, որի ձախ մասը Թեյլորի շարքի վերածելիս կստացվի՝

$$\begin{aligned} y(\tau, y_0 + \Delta y)_{\tau=t_0} &= (y(\tau, y_0) + \frac{\partial y(\tau, y_0)}{\partial y_0} \cdot \Delta y + \dots \\ &\dots + \frac{1}{k!} \cdot \frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \cdot \Delta y^k + \dots)_{\tau=t_0} = y_0 + \Delta y, \end{aligned}$$

որը, հաշվի առնելով $y(\tau, y_0)_{\tau=t_0} = y_0$ պայմանը, կընդունի հետևյալ տեսքը.

$$\left(\frac{\partial y(\tau, y_0)}{\partial y_0} - 1 \right) \Big|_{\tau=t_0} \cdot \Delta y + \dots + \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \right)_{\tau=t_0} \cdot \Delta y^k + \dots = 0 : \quad (23)$$

Ստացված (23) հավասարությունից, ելնելով Δy -ի կամայական լինելու հանգամանքից, հետևում է (22)-ը:

$\partial y(\tau, y_0)/\partial y_0$ ֆունկցիայի աջակողմյան եզրային պայմանը կորոշվի հետևյալ առնչությունից.

Եթե $y(\tau, y_0)$ ֆունկցիան (1) և (2) խնդրի համար էքստրեմալ է, ապա ($\tau = t$) արժեքի դեպքում տեղի ունի՝

$$\frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \Big|_{\tau=t} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots : \quad (24)$$

Հիմնավորում: $y(\tau, y_0)$ ֆունկցիայի ձախակողմյան y_0 եզրի կամայական Δy փոփոխության դեպքում, համաձայն (5)-ի՝ $y(\tau, y_0 + \Delta y)_{\tau=t} = y_t$, որի ձախ մասը Թեյլորի շարքով ներկայացման արդյունքում ստացվում է՝

$$y(\tau, y_0 + \Delta y)_{\tau=t} = (y(\tau, y_0) + \frac{\partial y(\tau, y_0)}{\partial y_0} \cdot \Delta y + \dots \\ \dots + \frac{1}{k!} \cdot \frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \cdot \Delta y^k + \dots)_{\tau=t} = y_t :$$

Համաձայն (5)-ի $y(\tau, y_0)_{\tau=t} = y_t$, հետևաբար, տեղի ունի՝

$$(y(\tau, y_0) + \frac{\partial y(\tau, y_0)}{\partial y_0} \cdot \Delta y + \dots + \frac{1}{k!} \cdot \frac{\partial^k y(\tau, y_0)}{\partial y_0^k} \cdot \Delta y^k + \dots)_{\tau=t} = 0 : \quad (25)$$

Δy -ի կամայական լինելուց (25)-ից կհետևեն (24) եզրային պայմանները:

Օրինակ: Որպես օրինակ դիտարկենք ձախակողմյան ամրակայված եզրերով հետևյալ խնդիրը.

$$I = \int_0^t (2 \cdot y \cdot \tau - \dot{y}^2) d\tau \rightarrow \max, \quad (26)$$

$$y(0) = 0, \quad y(t) = y_1 : \quad (27)$$

Էյլերի $\ddot{y} = -\tau$ հավասարման ինտեգրման արդյունքում կունենանք՝

$$\begin{cases} \dot{y} = -\tau^2/2 + C_1, \\ y = -\tau^3/6 + C_1 \cdot \tau + C_2, \end{cases} \quad (28)$$

որտեղ C_1 և C_2 -ը ինտեգրման հաստատուններն են և համաձայն (27)-ի՝

$$C_2 = 0, \quad C_1 = y_1/t + t^2/6 :$$

Հետևաբար, (28)-ից՝

$$\begin{cases} \dot{y}(\tau) = -\tau^2/2 + y_1/t + t^2/6, \\ y(\tau) = -\tau^3/6 + y_1\tau/t + t^2\tau/6, \end{cases} \quad (29)$$

որտեղից կորոշենք $y(\tau)$ -ի մասնակի ածանցյալները ըստ τ -ների՝

$$\partial y(\tau)/\partial t = -y_1\tau/t^2 + t\tau/3, \quad (30)$$

$$\partial y(\tau)/\partial y_1 = \tau/t : \quad (31)$$

Ստացված (29) և (30) արտահայտություններից կունենանք՝

$$\begin{cases} \dot{y}(\tau) = y_1/t - t^2/3, \\ (\partial y(\tau)/\partial t)_{\tau=t} = -(y_1/t - t^2/3) = -\dot{y}(t), \end{cases}$$

այսինքն, տեղի ունի (9) պայմանը:

Քանի որ $t_0 = 0$, (30)-ից կստացվի՝ $(\partial y(\tau)/\partial t)_{\tau=0} = 0$, որը համընկնում է (11)-ի հետ:

Նույն դատողություններով (31)-ից՝

$$\begin{aligned} (\partial y(\tau)/\partial y_1)_{\tau=t} &= 1, \\ (\partial y(\tau)/\partial y_1)_{\tau=0} &= 0, \end{aligned}$$

որոնք համընկնում են համապատասխանաբար (19) և (21) պայմանների հետ:

Եզրակացություն. Ունենալով վարիացիոն հաշվի (1) և (2) խնդրի $y(\tau, x)$ ($x \in \Gamma$) լուծումը և այդ ֆունկցիայի $\dot{y}(\tau, x)$ ածանցյալների արժեքները եզրերում, ստացված արդյունքների հիման վրա կարելի է որոշել $\partial y(\tau, x)/\partial x$ մասնակի ածանցյալ ֆունկցիաների եզրային պայմանները: Ստացված (9), (10), (11), (14), (15), (17), (19), (21), (22) և (24) եզրային պայմանները տեղի ունեն ոչ միայն (1) և (2) խնդրի լուծման, այլև կամայական թույլատրելի ֆունկցիաների դեպքում, որոնք ունեն առաջին և բարձր կարգի մասնակի ածանցյալներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Бояринов А.И., Кафаров В.В.** Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 564 с.
2. **Петров Ю.П.** Вариационные методы теории оптимального управления. – М.: Энергия, 1977. – 280 с.
3. **Burns J.A.** Introduction to the calculus of variations and Control with Modern Applications. - CRC press, Taylor & Francis Group, 2013. – 562 p.
4. **Саакян С.А.** Оценка изменения показателей эффективности в динамических системах управления // Вестник Инженерной академии Армении. – Ереван, 2005. – Т.2, №1. – С. 131-134.
5. **Саакян С.А., Дарахчян М.К.** Чувствительность оптимума в одномерных вариационных задачах управления // XI Международная научная заочная конференция “Актуальные вопросы современной техники и технологии”, 26 апреля 2013. – Липецк, 2013.- С. 111-116.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրության 20.09.2017:

С.А. СААКЯН, М.К. ДАРАХЧЯН

**ОЦЕНКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ УРАВНЕНИЙ ВАРИАЦИИ В
ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ВАРИАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Разработаны граничные условия неизвестных функций уравнений вариации в одномерных задачах вариационного исчисления оптимального управления. На основе полученных результатов можно решить уравнения вариации и оценить изменения функционала качества при изменениях параметров цели управления. Приведен численный пример.

Ключевые слова: оптимальное управление, вариация, уравнение Эйлера, граничные условия, ряд Тейлора.

S.A. SAHAKYAN, M.K. DARAKHCHYAN

**EVALUATION OF BOUNDARY CONDITIONS OF VARIATION EQUATIONS IN
ONE-DIMENSIONAL TASKS OF VARIATION CALCULUS OF OPTIMAL
CONTROL**

The boundary conditions of unknown functions in variation equations of optimal control one-dimensional variation calculus tasks are developed. Based on the obtained results, it is possible to solve variation equations, and to evaluate the quality functional changes in case of control purpose parameter changes. A numerical example is given.

Keywords: optimal control, variation, Euler equation, boundary conditions, Taylor series.

ՇՆՈՐՀԱԿԱԼԱՆՔԻ ԽՈՍՔ



Հայաստանի Հանրապետության գիտությունների ազգային ակադեմիայի (ՀՀ ԳԱԱ) և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) Տեղեկագրի Տեխնիկական գիտությունների սերիայի գլխավոր խմբագիրը վերջին երեք տասնամյակում հանդիսացել է ՀՀ ԳԱԱ նախագահ Ռադիկ Մարտիրոսի Մարտիրոսյանը: Անվանի գիտնականը ՀՀ ԳԱԱ նախագահի պաշտոնում հանրապետությունում գիտության և գիտական հետազոտությունների արժևորմանը նպատակաուղղված իր գործունեությունը, բեղմնավոր գիտական և դասախոսական աշխատանքը համատեղել է գիտական հանդեսի արդյունավետ ղեկավարման հետ: Նա իր էական ավանդը և անգնահատելի ներդրումն է ունեցել Տեղե-

կագրի Տեխնիկական գիտությունների սերիայի հետագա զարգացման, գիտական հանրության շրջանում դրա հեղինակության բարձրացման, գիտական հոդվածների թեմատիկայի ընդլայնման և հետազոտությունների մակարդակի բարձրացման, ինչպես նաև անաչառ գրախոսության համակարգի ներդրման գործում:

Խորին շնորհակալություն հայտնելով ակադեմիկոս Ռ.Մ. Մարտիրոսյանին երկար տարիների ընթացքում գիտական հանդեսի հիմնական ուղղորդողի դերը փայլուն կատարելու համար՝ հույս և համոզմունք ենք հայտնում, որ հետագայում ևս, անհրաժեշտության դեպքում, ականավոր գիտնականն իր գործուն աջակցությունը և օժանդակությունը կցուցաբերի պարբերականի բարելավման գործընթացին:

Մեծարգո Ռադիկ Մարտիրոսի,

Շնորհակալանքի խոսքի հետ մեկտեղ՝ խնդրում ենք ընդունել մեր ջերմագին բարեմաղթանքները՝ քաջառողջություն, երկար տարիների երջանիկ կյանք և նորանոր գիտական նվաճումներ, ինչպես նաև հաջող գործունեություն որպես «ՀՀ ԳԱԱ զեկույցներ» հանդեսի գլխավոր խմբագիր:

ՀԱՊՀ ռեկտորատ

Խմբագրական կոլեգիա

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ Մ.Է.

Երկու ժամի ժամանակահատվածում ԲԱՐՁՐԱՅԻՆ ՄԱՍԻՆԱՅԻՆ ՄԻՆԹԵԶԸ ԱՐՏԱԴՐԱԿԱՆ ԽԱՐԱՄՆԵՐԻՑ	3
---	---

ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Դ.Գ.

ՊՂՆՁԻ ԿՈՒՅՏԱՅԻՆ ՏԱՐԲԱԼՈՒԾՈՒՄԸ ԵՎ ԷՔՍՏՐԱԿՑԻՈՆ ԿՈՐԶՈՒՄԸ ՕՔՄԻԴԱՅԱԾ ՊՂՆՁԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՑՈՒԹԵՐԻՑ	11
--	----

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Մ.Գ., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս., ՕՐԴՅԱՆ Ն.Ա., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Խ.Վ.

ՀԱԼՈԳԵՆԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ ԱԼՄԱՍՏԱՅԻՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐԻ ՄԵՏԱՂԱՊԱՏՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՏԵՄԱԿԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ	18
--	----

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս., ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ Է.Գ., ԳԱԼՍՏՅԱՆ Լ.Զ.

ԵՐԿԱԹ-ՔՐՈՍ ՀԻՄՔՈՎ ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՓՈՇԵՀԱՄԱՁՈՒԼ ՎԱԾՔԻ ՇՓԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	29
---	----

ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ս.Ա., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա., ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Զ., ԱՎԱԳՅԱՆ Հ.Ս., ՍԱՐԳՍՅԱՆ Վ.Հ.

ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ (ՏՎՅԱԼ ԵՐԿՐԻ ՊԱՀԱՆՋՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ)	39
---	----

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Դ., ԵՂՈՅԱՆ Է.Ա.

ՋՐԱԾՆԻ ՊԱՍՄԻՎ ԱՎՏՈԿԱՏԱԼԻՏԻԿ ՌԵԿՈՄԲԻՆԱՏՈՐՆԵՐԻ ՆԵՐԴՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԸ ԱՏՈՄԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐՈՒՄ	51
--	----

ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ Տ.Ա.

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐԲԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՏԵՂԱԲԱՇԽՄԱՆ ԷՎՈԼՅՈՒՑԻՈՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	62
--	----

ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱԴԱՍՅԱՆ Գ.Վ., ՄԵԼԻՔՅԱՆ Ա.Վ.

ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԽՈՐԱՆԱՐԴ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ (I) (Դեկոմպոզիցիոն մոտեցում)	71
---	----

ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Տ.Ռ., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս.

ՈՉ ԿԱՆՈՆԱՎՈՐ ՑԱՆՑՈՎ ԵՐԿՉԱՓ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ԿՏՈՐ-ԳԾԱՅԻՆ ՄՈՏԱՐԿՈՒՄԸ	80
---	----

ՍԱՀԱԿՅԱՆ Ս.Ա., ԴԱՐԱՆՉՅԱՆ Մ.Կ.

ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻԱՉԱՓ ՎԱՐԻԱՑԻՈՆ ՀԱՇՎԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ՎԱՐԻԱՑԻԱՅԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵԶՐԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ	86
--	----

СОДЕРЖАНИЕ

САСУНЦЯН М.Э. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ МОНОСИЛИЦИДА ЖЕЛЕЗА ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ШЛАКОВ	3
ВАРДАНЯН Д.Г. КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ И ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД	11
АГБАЛЯН С.Г., АГБАЛЯН А.С., ОРДЯН Н.А., ПОГОСЯН Х.В. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН В ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ	18
ПЕТРОСЯН А.С., АМБАРЦУМЯН Э.Г., ГАЛСТЯН Л.З. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРОХРОМА	29
ГЕВОРГЯН С.А., ГЕВОРГЯН А.А., МАРУХЯН В.З., АВАГЯН О.С., САРГСЯН В.О. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ (С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ДАННОЙ СТРАНЫ).....	39
ПЕТРОСЯН В.Г., ГРИГОРЯН А.Д., ЕГОЯН Е.А. ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ПАССИВНЫХ АВТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА НА АЭС	51
ГАСПАРЯН Т.А. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА НАЧАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.....	62
СИМОНЯН С.О., АДАМЯН Г.В., МЕЛИКЯН А.В. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КУБИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ (II) (Декомпозиционный подход)	71
МЕЛКОНЯН Т.Р., СУКИАСЯН Г.С. О КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТКОЙ	80
СААКЯН С.А., ДАРАХЧЯН М.К. ОЦЕНКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ УРАВНЕНИЙ ВАРИАЦИИ В ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ВАРИАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	86

CONTENTS

SASUNTSYAN M.E. HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF IRON MONOFERROSILICIDE FROM PRODUCTION WASTES	3
VARDANYAN D.G. HEAP LEACHING AND EXTRACTION RECOVERY OF COPPER FROM OXIDIZED COPPER ORES	11
AGHBALYAN S.G., AGHBALYAN A.S., ODYAN N.A., POGHOSSYAN KH.V. THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METALLIZATION PROCESS OF DIAMOND PARTICLES IN A HALOGEN-CONTAINING ENVIRONMENT	18
PETROSYAN H.S., AMBARZUMYAN E.G., GALSTYAN L.Z. INVESTIGATING THE WEAR RESISTANCE OF POWDER ALLOYS BASED ON FERRO-CHROME	29
GEVORGYAN S.A., GEVORGYAN A.A., MARUKHYAN V.Z., AVAGYAN H.S., SARGSYAN V.H. DEVELOPING A METHOD FOR SELECTING NUCLEAR POWER UNITS (CONSIDERING THE REQUIREMENTS FOR THE GIVEN COUNTRY)	39
PETROSYAN V.G., GRIGORYAN A.D., YEGHOYAN E.A. PROBLEMS OF IMPLEMENTING PASSIVE AUTOCATALYTIC HYDROGEN RECOMBINERS AT NPPs	51
GASPARYAN T.A. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF EVOLUTION ALGORITHM FOR THE INITIAL THERMAL PLACEMENT OF INTEGRATED CIRCUIT CELLS	62
SIMONYAN S.H., ADAMYAN G.V., MELIKYAN A.V. METHODS OF SOLVING ONE-PARAMETER CUBIC MATRIX EQUATIONS (Decomposition approach)	71
MELKONYAN T.R., SUKIASYAN H.S. THE DIMENSIONAL-LINEAR APPROXIMATION OF TWO-DIMENSIONAL FUNCTION WITH A NON-REGULAR NET	80
SAHAKYAN S.A., DARAKHCHYAN M.K. EVALUATION OF BOUNDARY CONDITIONS OF VARIATION EQUATIONS IN ONE-DIMENSIONAL TASKS OF VARIATION CALCULUS OF OPTIMAL CONTROL	86