



**Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının  
XƏBƏRLƏRİ**

*Beynəlxalq elmi-texniki jurnal*

**HERALD  
of the Azerbaijan Engineering Academy**

*The international science-technical journal*

**ВЕСТНИК  
Азербайджанской Инженерной Академии**

*Международный научно-технический журнал*

Cild 15. № 3

Vol. 15. № 3

Том 15. № 3

**BAKİ – 2023**

**Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının  
XƏBƏRLƏRİ**

*Beynəlxalq elmi-texniki jurnal*

**Baş redaktor – akademik A.M. Paşayev**

**Baş redaktorun müavini – akademik Ə.X. Cənəhmədov**

**REDAKSIYA HEYƏTİ:**

akademik **Ə.M. Abbasov**, akademik **B.H. Əliyev**, akademik **C.C. Əsgərov**, müxbir üzv **K.Ə. Əsgərov**,  
akademik **N.H. Cavadov**, akademik **M.Y. Cavadov**, müxbir üzv **M.H. Həsənov**,  
müxbir üzv **Ə.G. Hüseynov**, professor **A.Y. Qriqoryev** (*Belarus*), akademik **B.V. Qusev** (*Rusiya*),  
müxbir üzv **K.T. Nəbizadə**, akademik **H.Ə. Məmmədov**, akademik **G.H. Məmmədova**,  
akademik **H.F. Mirələmov**, akademik **S.Y. Müslümov**,  
müxbir üzv **S.R. Rəsulov**, akademik **İ.R. Sadıqov**

**REDAKSIYA ŞURASI:**

prof. **N. Antoneski** (*Rumuniya*), prof. **Konstantin Bravo** (*İsrail*), prof. **İqor Emri** (*Sloveniya*),  
prof. **F. Franek** (*Avstriya*), prof. **K. Fridrix** (*Almaniya*), akademik **B.T. Jumaqulov** (*Qazaxıstan*),  
prof. **G.S. Kalda** (*Polşa*), prof. **D. Mavrakis** (*Yunanıstan*),  
akademik **S.V. Panin** (*Rusiya*), akademik **A.İ. Prangişvili** (*Gürcüstan*),  
akademik **R.Z. Saqdeyev** (*ABŞ*), prof. **Junq-Young Son** (*Koreya*),  
akademik **Ə.X. Şahverdiyev** (*Rusiya*), akademik **A.İ. Vasilyev** (*Ukrayna*),  
prof. **A.İ. Volçenko** (*Ukrayna*), prof. **Tuncay Yalçınkaya** (*Türkiyə*)

---

---

*The international science-technical journal*  
**HERALD**  
**of the Azerbaijan Engineering Academy**

**Editor-in-chief – academician A.M. Pashayev**

**Deputy editor-in-chief – academician A.Kh. Janahmadov**

**EDITORIAL BOARD:**

academician **A.M. Abasov**, academician **B.H. Aliev**, academician **J.J. Asgarov**,  
corresponding member **K.A. Asgarov**, academician **N.H. Javadov**, academician **M.Y. Javadov**,  
corresponding member **M.H. Hasanov**, corresponding member **A.G. Huseynov**,  
professor **A.Ya. Grigoriev** (*Belarus*), academician **B.V. Gusev** (*Russia*),  
corresponding member **K.T. Nabizada**, academician **G.A. Mamadov**,  
academician **G.H. Mamadova**, academician **H.F. Miralamov**,  
academician **S.Y. Muslimov**, corresponding member **S.R. Rasulov**, academician **I.R. Sadigov**

**EDITORIAL ADVISORY BOARD:**

professor **N. Antonesku** (*Romania*), professor **Konstantin Bravo** (*Israel*),  
professor **İgor Emri** (*Slovenia*), professor **F. Franek** (*Austria*), professor **K. Friedrich** (*Germany*),  
professor **G.S. Kalda** (*Poland*), professor **Junq-Young Son** (*Korea*), professor **D. Mavrakis** (*Greece*),  
academician **S.V. Panin** (*Russia*), academician **A.I. Prangishvili** (*Georgia*),  
academician **R.Z. Saqdeev** (*USA*), academician **A.Kh. Shahverdiyev** (*Russia*),  
academician **A.I. Vasilyev** (*Ukraine*), **A.I. Volchenko** (*Ukraine*),  
professor **Tuncay Yalcinkaya** (*Turkey*), academician **B.T. Zhumagulov** (*Kazakhstan*)

**TƏSİSÇİ: “Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası”** ictimai birliyi.

Jurnal 2009-cu ilin noyabr ayından nəşr olunur. Dövriliyi ildə 4 dəfədir.

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyində qeydiyyatda alınmışdır.

Qeydiyyat № 2965, 23.06.2009-cu il.

Jurnal Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının reyestrinə namizədlik və doktorluq dissertasiyalarının nəticələrinin dərc olunması üçün daxil edilmişdir.

Jurnal “Rusiyanın elmi sitat indeksləşməsi” (RESİ) layihəsinə daxil edilib.

Jurnalın tam mətn elektron versiyası “Rusiya Universal Elmi Elektron kitabxanasının bazası”nda mövcuddur (<http://www.elibrary.ru>).

Nəşr olunmuş məqalələrə DOI (Obyektin Rəqəmsal İdentifikatoru) verilir.

Jurnal International Scientific Indexing (ISI) və Scientific Journal Impact Factor (SJIF) Beynəlxalq Elmi Sitalaşma Bazalarına yerləşdirilib. SERTİFİKATLAR verilib, impakt faktor ISI – 1.888 və impakt faktor SJIF – 8.503.

Jurnal «Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0» Beynəlxalq lisenziya ilə lisenziyalasdırılıb.

Jurnal Web of Science Beynəlxalq Elmi Sitalama Bazasında yerləşdirilməyə təqdim olunub.

Jurnal “AzərPoçt” ASC-nin poçt bölmələrində abunə olmaq olar. Abunə il boyu davam edir. Abunə indeksi: Hüquqi və fiziki şəxslər üçün – 1156.

**Redaksiyanın ünvanı:**

Puşkin küçəsi 30, 3-cü mərtəbə.,

Bakı ş. AZ1010,

Azərbaycan Respublikası

Tel/Faks: (+99412) 598 24 52

E-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com)

<http://ama.com.az>

**FOUNDER:** Public union

“Azerbaijan Engineering Academy”

Journal published since November, 2009.

Issued 4 times a year.

Certificate about registration №2965, June 23, 2009 was given by Ministry of Justice of the Republic of Azerbaijan.

Journal was included into the list of education for publication of result of candidate and doctoral thesis by the supreme Attestation Commission Attached to the President of the Republic of Azerbaijan.

The journal is part of the project “Russian Science Citation Index” (RSCI).

The full text of journal is available electronically through Russian Universal Scientific Electronic Library database (<http://www.elibrary.ru>).

All articles are assigned the DOI (Digital Object Identifier).

Journal was included into International Scientific Indexing (ISI) and Scientific Journal Impact Factor (SJIF), issued a CERTIFICATES, impact factor ISI – 1.888 and impact factor SJIF – 8.503.

Journal licensed under Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0.

The journal is submission to be posted on the International Database of Scientific Citation Web of Science.

Subscription to journal may be drawn up at post offices of OJSC “AzərPoçta” Subscription index: For juristic and for natural persons – 1156.

**Address of editorial offices:**

Pushkin str., 30, 3 floor,

Baku, AZ1010,

Azerbaijan Republic

Tel/Fax: (+99412) 598 24 52

E-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com)

<http://ama.com.az>

**УЧРЕДИТЕЛЬ:** Общественное объединение «Азербайджанская Инженерная Академия».

Журнал издается с ноября 2009 года.

Периодичность: 4 раза в год.

Зарегистрирован Министерством Юстиции Азербайджанской Республики.

№ регистрации: 2965 от 23.06.2009 г.

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации основных результатов кандидатских и докторских диссертаций Высшей аттестационной комиссии при Президенте Азербайджанской Республики.

Журнал представлен в проекте «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

Полнотекстовая электронная версия журнала размещена в базе данных Российской универсальной научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>).

Опубликованным статьям присваивается Цифровой Идентификатор Объекта DOI.

Журнал размещен в Международных базах научного цитирования International Scientific Indexing (ISI) и Scientific Journal Impact Factor (SJIF), выданы СЕРТИФИКАТЫ, импакт фактор ISI – 1.888 и импакт фактор SJIF – 8.503.

Журнал лицензирован по международной лицензии Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0.

Журнал представлен к размещению в международных базах научного цитирования Web of Science (WoS).

Подписка на журнал осуществляется в отделениях ОАО «AzərPoçta» и продолжается в течение года. Индекс подписки для юридических и физических лиц: 1156.

**Адрес редакции:**

ул. Пушкина, 30, 3-й этаж,

Баку, AZ1010,

Азербайджанская Республика,

Тел./Факс: (+99412) 598 24 52

E-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com)

<http://ama.com.az>



ISSN 2076-0515 (print)  
ISSN 2789-8245 (online)

© Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası, 2023  
© Azerbaijan Engineering Academy, 2023  
© Азербайджанская Инженерная Академия, 2023

# M Ü N D Ə R İ C A T

## Aviasiya

**İsmayılov İ.M.** Süni intellektdən istifadə etməklə hava gəmisinin uçuşunun təhlükəsizliyinin idarə olunması konsepsiyası .....7

**Fatyanova N.V.** Gəmiqayırma və aviasiya sənayesində lak və boya örtüklərində nanotəbaşir və nanotalk əsaslı doldurucuların tətbiqi ilə metalın korroziyaya davamlılığının artırılması .....15

## Mexanika və maşınqayırma

**Canəhmədov Ə.X., Volçenko N.A., Cavadov M.Y., Volçenko D.A., Burava A.S., Prisyajniy A.V., Juravlev D.Y.** Əyləclərin metal friksion elementlərinin fırlanan sistemlərinin nanomayelərində çökmə və diffuziya (II hissə) .....28

**Əliyeva S.Y., Kərimova İ.M.** Qasnaqlarda və bloklarda gərginliyin təhlili .....38

## Neft və qaz

**Paşayev A.M., Vəliyev N.A., Əsgərov K.Ə., Musayev A.A., Məmmədov İ.X., Allahverdiyev K.R., Sadıxov İ.Z.** Abşeron yarımadasına məxsus xam neft nümunələrinin Raman səpilməsi spektrlərinin fərqləndirici xüsusiyyətləri .....51

**Nağızadə A.R., İsmayılova F.B.** Magistral qaz kəmərlərinin konstruktiv etibarlılığının müasir proqram təminatı vasitəsilə hesablanması .....59

**Dadaş-zadə X.İ., Qadaşova E.V.** Sferik radial süzülmə zamanı üç ölçülü modelin tətbiqinin skin-faktora görə təyini .....66

**Məmmədov A.T., Hüseyinov M.Ç., Musurzayeva B.B., Cəfərova A.A.** “Dəmir-çuqun” tip ovuntu kompozitlərinin elastikiplastiki deformasiyasının xüsusiyyətləri .....71

## İnformasiya texnologiyaları

**Həsənov M.H., Məmmədov F.H., Sultanova Ş.A., İsrailova Q.A.** GSM standartlı mobil telekommunikasiya şəbəkələrinin ehtimal-zaman xarakteristikalarının tədqiqi ....80

**Məmmədov F.H., Həsənov M.H., Qarayev N.Ç.** Müxtəlif növ trafiklərin ötürülməsi zamanı NGN şəbəkələrində yaddaş buferinin həcmi qiymətləndirilməsi .....90

**Əliyeva İ.N.** Xətti əks rəbitəli sürüşmə registri alqoritmi əsasında psevdotəsadüfi rəqəm generator .....97

**Məmmədova K.A.** TOPSIS metodu və qeyri-səlis qaydalar əsasında qərarların qəbulu ..... 104

## Energetika

**Hüseyinov F.H.** Süni intellekt metodları əsasında elektrik mühərriklərinin diaqnostik monitorinqi ..... 111

## Ekologiya

**Əsgərov K.Ə., Əhmədova S.T.** Partlayıcı maddələrin aşkarlanması üçün ekspress-üsullarının tətbiqi ..... 122

## CONTENTS

### Aviation

- Ismayilov I.M.** Concept of Aircraft Flight Safety Management Using Artificial Intelligence .....7
- Fatyanova N.V.** Increasing the Corrosion Resistance of Metal Through the Application of Fillers Based on Nanochalk and Nanotalc in Paint and Varnish Materials in Shipbuilding and Aircraft Industry .....15

### Mechanics and Mechanical Engineering

- Janahmadov A.Kh., Volchenko N.A., Javadov M.Y., Volchenko D.A., Burava A.S., Prisyazhniy A.V., Zhuravlev D.Yu.** Sedimentation and Diffusion of Nanofluids in Rotating Systems of Metal Friction Elements of Brake (Part II) .....28
- Aliyeva S.Y., Kerimova I.M.** The Stress Analysis in Pulleys and Blocks .....38

### Oil and Gas

- Pashayev A.M., Valiyev N.A., Asgerov K.E., Musayev A.A., Mammadov I.Kh., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** Distinctive Features of Raman Spectroscopy of Crude Oils of the Absheron Peninsula .....51
- Nagizade A.R., Ismaylova F.B.** Calculation of Structural Reliability of Main Gas Pipelines Using Modern Software Application .....59
- Dadash-zada X.I., Gadashova E.V.** Application of Three-Dimensional Models on Spherical-Radial Filtration the Skin Zone .....66
- Mamedov A.T., Huseynov M.Ch., Musurzaeva B.B., Jafarova A.A.** Features of Elastoplastic Deformation Powder Composites of the "Iron Cast" Type .....71

### Information technologies

- Hasanov M.H., Mammadov F.H., Sultanova S.A., Israfilova Q.A.** Study of Probability-Time Characteristics of GSM Standard Mobile Telecommunication Networks .....80
- Mammadov F.H., Hasanov M.H., Garayev N.Ch.** Assessment of the Memory Buffer Size in NGN Networks when Transferring Different Traffic Types .....90
- Aliyeva I.N.** Pseudorandom Number Generator Based on Linear Feedback Shift Register Algorithm .....97
- Mammadova K.A.** TOPSIS Method and Fuzzy Rules on The Decision Making Based .....104

### Energetics

- Huseynov F.H.** Diagnostic Monitoring of Electric Motors Based on Artificial Intelligence Methods .....111

### Ecology

- Askerov K.A., Ahmadova S.T.** Application of Express Methods for the Detection of Explosive Substances .....122

## СОДЕРЖАНИЕ

### Авиация

- Исмаилов И.М.** Концепция управления безопасностью полета воздушного судна с использованием искусственного интеллекта .....7
- Фатьянова Н.В.** Повышение коррозионной стойкости металла за счет применения наполнителей на основе наномела и наноталька в ЛКМ в судно- и авиационной .....15

### Механика и машиностроение

- Джанахмедов А.Х., Вольченко Н.А., Джавадов М.Я., Вольченко Д.А., Бурава А.С., Присяжный А.В., Журавлев Д.Ю.** Седиментация и диффузия в наножидкости во вращающихся системах металлических фрикционных элементов тормозов (ч. II) .....28
- Алиева С.Я., Керимова И.М.** Анализ напряжения в шкивах и блоках .....38

### Нефть и газ

- Пашаев А.М., Велиев Н.А., Аскеров К.Е., Мусаев А.А., Мамедов И.Х., Аллахвердиев К.Р., Садыхов И.З.** Отличительные характеристики рамановской спектроскопии сырой нефти Апшеронского полуострова .....51
- Нагизаде А.Р., Исмайылова Ф.Б.** Расчет конструктивной надежности магистральных газопроводов с использованием современного программного обеспечения .....59
- Дадашзаде Х.И., Гадашова Э.В.** Применение моделей трехмерной, сферически-радиальной фильтрации для определения основных показателей скважины с учетом скин-зоны .....66
- Мамедов А.Т., Гусейнов М.Ч., Мусурзаева Б.Б., Джафарова А.А.** Особенности упругопластического деформирования порошковых композитов типа «железочугун» .....71

### Информационные технологии

- Гасанов М.Г., Мамедов Ф.Г., Султанова Ш.А., Исрафилова Г.А.**  
Исследование временно-вероятностных характеристик сетей мобильной связи стандарта GSM .....80
- Мамедов Ф.Г., Гасанов М.Г., Гараев Н.Ч.** Оценка объема буфера памяти в сетях NGN при передаче различных типов трафика .....90
- Алиева И.Н.** Генератор псевдослучайных чисел на основе алгоритма регистра сдвига с линейной обратной связью .....97
- Мамедова К.А.** Метод TOPSIS и принятие решений на основе нечетких правил .....104

### Энергетика

- Гусейнов Ф.Х.** Диагностический мониторинг электродвигателей на основе методов искусственного интеллекта .....111

### Экология

- Аскеров К.А., Ахмедова С.Т.** Применение экспресс-методов обнаружения взрывоопасных веществ .....122

# **Concept of Aircraft Flight Safety Management Using Artificial Intelligence**

**I.M. Ismayilov**

*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ 1045, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Ismayilov Ismayil / e-mail: ismayil.maa@gmail.com

**Abstract**

The article proposes a new concept of building an intelligent aircraft control system, which increases the functionality of the system for its adaptation to the controlled object. Enhanced adaptive system functionality is knowledge-based to help pilots perform important and safety-critical tasks on modern aircraft. The implementation of the proposed system is based on the pilot's situational awareness of the flight progress in real time, which allows avoiding errors and maintaining enhanced synergy between human and avionics systems. These synergies provide significant improvements in overall flight control performance and safety. Appropriate mathematical models are introduced to assess the mental load associated with each piloting task and assess the pilot's cognitive abilities and condition.

**Keywords:** flight safety, aircraft, intelligent aviation system, accident threat, prevention, control system, artificial intelligence.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_07\_14

**Received** 27.04.2023

**Revised** 19.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Ismayilov I.M.*

[Concept of Aircraft Flight Safety Management Using Artificial Intelligence]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 7-14 (in English)*

## **Süni intellektdən istifadə etməklə hava gəmisinin uçuşunun təhlükəsizliyinin idarə olunması konsepsiyası**

**İ.M. İsmayilov**

*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

İsmayilov İsmayıl / e-mail: ismayil.maa@gmail.com

### **Xülasə**

Məqalədə, sistemin nəzarət olunan obyektə adaptasiyasına görə onun funksional imkanlarını yüksəldən hava gəmisinin idarə olunmasının intellektual sisteminin qurulmasının yeni konsepsiyası təklif edilir. Adaptasiyaya görə sistemin funksional imkanlarının yüksəldilməsi müasir təyyarələrdə uçuşların təhlükəsizliyi nöqtəyi nəzərindən pilotlar tərəfindən mühüm və kritik məsələlərin həllində onlara kömək məqsədilə biliklərə əsaslanmışdır. Təklif olunan sistemin realizəsi real zaman rejimində uçuşun gedişi barəsində pilotun şəraitə (situasiyaya) bələd olması əsasında həyata keçirilir. Bu işə səhvlərdən qaçmağa və insanla avionika sistemləri arasında geniş sinergizmi dəstəkləməyə imkan verir. Bu sinerjiyalar təyyarənin idarə olunmasının ümumi məhsuldarlığını və təhlükəsizliyin səviyyəsini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırır. Müvafiq riyazi modellər təyyarənin idarə olunmasının hər bir məsələsi ilə bağlı olan zehni yükün və pilotun vəziyyətinin, həmçinin onun koqnitiv qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi üçün daxil edilir.

**Açar sözlər:** uçuş təhlükəsizliyi, təyyarə, intellektual aviasiya sistemi, qəza təhlükəsi, idarəetmə sistemi, süni intellekt.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_07\_14

УДК 621-192; 621.81-192

## **Концепция управления безопасностью полета воздушного судна с использованием искусственного интеллекта**

**И.М. Исмаилов**

*Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардаканский пр., 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Исмаилов Исмаил / e-mail: ismayil.maa@gmail.com

### **Аннотация**

В статье предлагается новая концепция построения интеллектуальной системы управления воздушным судном, которая повышает функциональные возможности системы по ее адаптации к контролируемому объекту. Повышение функциональной возможности системы по адаптации основано на знаниях, чтобы помочь пилотам в выполнении важных и критичных с точки зрения безопасности полетов задач на современных самолетах. Реализация предлагаемой системы осуществляется на основе ситуационной осведомленности пилота о ходе полета в реальном времени, что позволяет избежать ошибок и поддерживать расширенный синергизм между человеком и системами авионики. Эти синергии дают значительное улучшение общей производительности управления полетом и повышение уровня безопасности. Соответствующие математические модели вводятся для оценки умственной нагрузки, связанной с каждой задачей пилотирования, и оценки когнитивных способностей и состояния пилота.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, летательные аппараты, интеллектуальная авиационная система, угроза авиационных происшествий, предотвращение, система управления, искусственный интеллект.

## **Introduction**

At present, an urgent problem is the question of the rational use of the achievements of scientific and technological progress in the field of complex systems based on artificial intelligence (AI). AI is a field of science that deals with the creation of machines and computer programs that allow solving intellectual problems by modeling intelligent behavior. The relevance of intelligent systems lies in the need to reduce the human factor on the control object while maintaining a high level of safety and reliability during its technical operation, which is of particular importance in the aviation industry [1-5]. An even greater challenge in the aviation industry is solving aircraft control issues based on strong intelligence. Experts are of the opinion that equipping artificial intelligence with pre-formed rules will ensure the proper safety of passengers and crew of aircraft.

Intelligent Flight Control (IFC) is defined by autonomous adaptive control algorithms that can find non-trivial solutions to control problems using trivial strategies. Conventional civil aviation autopilots are not adaptive (a human pilot must act if something unexpected happens), autonomous systems must be able to adapt themselves to changing circumstances. This is where intelligent flight control systems come in.

The flight management system (FMS) currently used in aircraft is one of the key elements of a modern aircraft. This is a computer system that helps the pilot to perform various routine operations. The FMS includes numerous artificial intelligence algorithms to support aircraft navigation, guidance and control. The FMS implements algorithms for determining the location of an aircraft using navigation aids data and combining data from

several sensors.

The operation of each system of a modern aircraft is associated with the use of numerous digital computers. Each of these systems uses some elements of artificial intelligence at different levels of control and data processing. All automatic control functions can be attributed to artificial intelligence. In general, system control is based on a well-defined mathematical model of the process and a set of parameters, each of which can be polled to change the state of the system.

Intelligent flight control is based on two apparently unrelated knowledge. The first is rooted in the classical analysis of aircraft stability, control and flight quality. The second follows from human psychology and physiology. Thus, there is a need to find new control structures that are consistent with the causes of situations that have arisen in flight, and bring flight control systems to a higher level of adaptation to the controlled object.

## **Statement of a question**

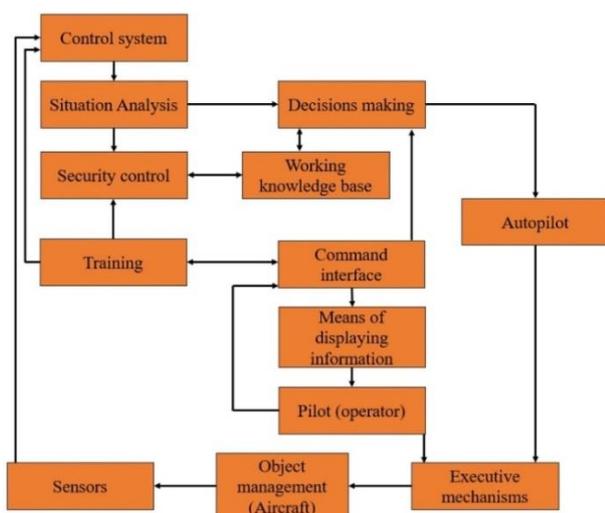
The aim of the work is to create methodological foundations for aircraft flight safety management as a set of principles, methods and algorithms for assessing the threat of an aviation accident, its prediction and countering, which are implemented as part of the functioning of an intelligent aviation system and make it possible to increase the efficiency and safety of aircraft control carried out in difficult flight conditions.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: propose the structure of the intelligent aviation system; to carry out a system analysis of the intelligent aviation system; develop a methodology for the safety of aircraft management.

**Solution** - development of an intelligent

aviation system. An intelligent aviation system (IAS) is proposed, developed on the basis of the aviation transport system, which is a complex of interacting systems, the functions of which are aimed at ensuring the life cycle of the aircraft.

The structure of the onboard intelligent flight control system is shown in Fig.1 [5].



**Figure 1** – The structure of the onboard intelligent flight control system

Let us consider the functions of individual modules of the system (Fig. 1), which have the property of intelligence and ensure the choice and implementation of the best flight control strategy under conditions of uncertainty. The analysis module receives sensory information about the situation from aircraft sensors. This information is displayed by the control system, which highlights situations that are significant from the point of view of decision-making, and, based on the results of the forecast, evaluates the severity of the hazard. The development of situations is predicted using the security control module. This module helps prevent the right decisions from being made before real threats emerge.

Through the command interface and flight information display (FID) systems, the

pilot receives advisory information, which is generated by the decision-making module. On the basis of this information, the pilot exerts control actions applied through the autopilot directly to the aircraft actuators, taking into account the nature of the development of the situation.

Formed control options that can be changed and refined as current information is updated are contained in the working knowledge base (KB). The decision-making module and the working knowledge base together form a dynamic expert system (DES), ensuring the coordinated operation of all modules of the onboard IMS and the formation of solutions in real time. The formation or correction of knowledge bases is provided by the training module. The results of the correction are used in the modules for analyzing the situation and forecasting situations.

The command interface performs the interaction of the pilot with the aircraft, informing the pilot, on the one hand, about the state of the control object and the environment through on-board information systems, and, on the other hand, influencing the aircraft and its systems using various means and controls [6]. It should be noted that modern sensors used in aircraft are mainly built on the basis of microprocessors and therefore they are usually called intelligent devices.

To ensure the operation of the system as a whole, it must include a link that integrates the remaining links. The characteristics of a person allow him to be such a link, since a person can adapt to various conditions, relying on intuition, he is able to make decisions quickly, without having a choice of options. However, it must be borne in mind that a person gets tired very quickly when performing monotonous actions. This, as well as many of

the shortcomings of a person can be compensated by automatic devices with a rational distribution of functions between the pilot and the autopilot.

**System Analysis of Intelligent Aviation System.** An intelligent aviation system belongs to organizational and technical systems, therefore, it has the characteristics of technical and organizational systems. These properties determine the basic principles of the functioning of the IAS, which are aimed at managing the safety of the aircraft flight.

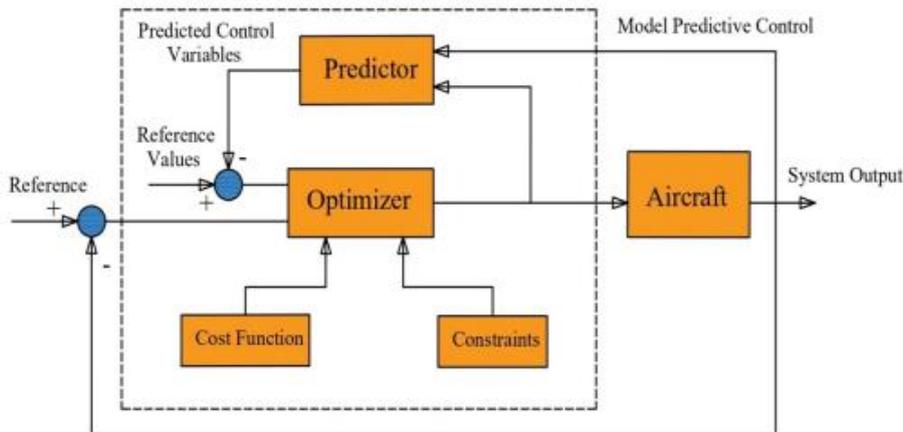
Complex organizational and technical systems (for example, aviation and transport systems) are characterized by a large array of input multidimensional data that affect the safety of their operation, taking into account their heterogeneity. It is the use of artificial intelligence methods and system analysis that makes it possible to process such data. In addition, artificial intelligence tools are widely used in operator decision support systems in such systems. Based on this, the development of methods for assessing and predicting the threat of an aviation accident based on direct control of changes in the values of variables affecting flight safety using artificial intelligence tools is an urgent scientific problem. The solution of this issue will make it possible to identify the immediate causes of the accident and take appropriate measures to parry these accidents.

System analysis is carried out on the basis of a predictive control model (PMC) of an aircraft flight based on an effective intelligent algorithm. The improvement of the predictive model of aircraft flight is considered when flying in the longitudinal direction. The intelligent control algorithm is mainly designed to

study and improve the PMC parameters based on the minimization of various time intervals of the objective functions. The proposed model of the aircraft takes into account the dynamics of the aircraft and the restrictions imposed on it. Non-linear aircraft dynamics, gust-driven disturbances, parameter uncertainty, and environmental changes are considered major obstacles to aircraft control to ensure good flight performance.

**Development of an aircraft control safety methodology based on a predictive control model.** An accurate mathematical model of an aircraft is considered an important first step to analyze and control an aircraft system that can be used to solve control and stability problems. The resulting model changes flight characteristics that are used for surface control and flight system design. Correcting the direction and altitude of the aircraft with less error during its flight is the main goal of control. In this case, the goal of control in the process of flight dynamics is to correct the direction of the aircraft around its center. The definition of flight dynamics is summarized as the science of guiding air vehicles and the task of steering around certain three dimensions called pitch, roll and yaw control [7]. The block diagram of the PMC flight control is shown in Fig.2. Flight control is based on a predictive control model.

This model includes a block of predictable control variables that are compared with the initial values of the variables. The difference signal is transmitted to the optimizer, which receives the values of the cost function and the constraint at the same time. The optimizer signal is transmitted to the aircraft and thus the system output is formed.



**Figure 2** – MPC fight control block diagram

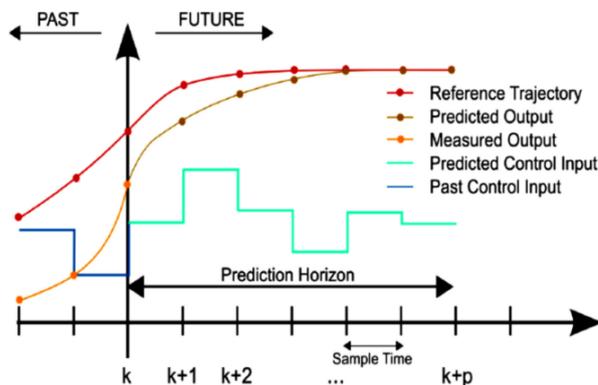
An intelligent control algorithm is proposed as a powerful and intelligent method for solving the problem of setting PMC parameters to improve their performance [8].

This algorithm is considered one of the most effective algorithms for tuning parameters of various types of controllers for many practical applications. The algorithm has important features such as working with multiple parameters that are used for initialization when parameters with fewer than other types of algorithms are used. Another important advantage is that the convergence rate does not depend on the parameters used. The algorithm requires several tuning factors to reduce the longitudinal deviation of aircraft motion from non-linear aircraft dynamics, gust interference, parameter uncertainty, and environmental changes.

The proposed PMK as an effective controller that can cope with uncertainty, nonlinearities and disturbances is used for aircraft control tasks. The MPC based on an intelligent algorithm is used to control the longitudinal movement of the aircraft in order to reduce low-frequency vibrations. The function of the algorithm is to find the best PMC parameters based on the decay of various objective func-

tions in the time domain. Basically, the PMC calculations are performed at each sampling time, which can be configured by the control system designer. These calculations depend on measurements and prediction of upcoming output values. There are two calculation styles in MPC: the first one is the calculation of the setpoints, the second one is the control calculations. Control calculations contain process limits and other parameters that you can set manually.

Control calculations depend on reducing predicted deviations from the command trajectory. The main idea of the MPC strategy is shown in Fig. 3.



**Figure 3** – The idea behind the MPC strategy

On the left side of the ordinate axis, the values of the variables at the previous point in time are indicated, on the right side, the predicted values.

Different colors on the graph indicate: prediction horizon, trajectory curve, predicted output, measured output, predicted entry control, previous controlled entry.

The action of the MPC controller depends on a mathematical representation called the cost function ( $J(k)$ ). The mathematical representation of system constraints and the cost function is presented below [9, 10]:

$$J(k) = \sum_{i=1}^P Q \cdot [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^2 + \sum_{i=0}^{M-1} R \cdot [\Delta u(k+i|k)]^2$$

Given that:

$$y_{\min} \leq \hat{y}(k+i|k) \leq y_{\max}$$

$$u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+i|k) \leq \Delta u_{\max}$$

In the equations above, the prediction horizon is denoted as  $P$  and the control horizon as  $M$ . Discrete time as  $k$ ,  $i$ -interval indicator  $P$ ,  $Q$ , and  $R$  denote the inference error weights and the change in the manipulated variable, respectively.

In addition,  $r(k+i | k)$  represent a prediction and a command based on the output at time  $k+i$ , respectively.

In addition,  $u(k+i | k)$  and  $\Delta u(k+i | k)$  represent the best prediction based on the manipulated variable and the prediction rate of the manipulated variable at time  $k+i$ , respectively.

The proposed MPL controller will receive a signal from the control stick and set the control stick point value in inches as a system input to represent the system control signal. Pilot joystick command values are selected as stepped, multi-step, and square wave signals. The MPC strategy is used to predict the control signal depending on the stick signal and the stick inch setpoint as system input. The proposed control design was developed using the MPC toolkit in Matlab.

Taking into account the sampling time period ( $T_s$ ) and the number of applied control signals ( $N$ ), the MPC methodology will operate at a certain rate equal to  $1/N \cdot T_s$ . You need to know that the choice of suitable  $T$  is important, as it calculates the length of the prediction step. In addition, the behavior and performance of the MPC is inevitably affected by the choice of  $P$  and  $M$ . In addition, there are two numerical weight parameters,  $Q$  and  $R$ , which must be carefully chosen for the input and output of the system, respectively. As a result, an intelligent algorithm is used to obtain the best  $T_s$ ,  $P$ ,  $M$ ,  $Q$  and  $R$  values.

This study is focused on tuning the parameters of the MPC to control the longitudinal flight of an aircraft using an intelligent algorithm. The main goal of optimization is to identify the optimal parameters of the MPC that improve the damping characteristics of the onboard system by reducing the integral absolute error in time.

## Conclusion

The concept of building an intelligent aircraft control system is considered, which increases the functionality of the system for its adaptation to the controlled object and helps pilots make the right decisions when performing important and critical tasks from the point

of view of the flight safety of modern aircraft. This concept is based on the creation of a predictive control model as an effective controller that can cope with uncertainty, non-linearities and disturbances, used for aircraft control tasks. An intelligent algorithm-based MPC is used to control the longitudinal motion of an aircraft in order to reduce the longitudinal deviation of the aircraft's motion from the non-

linear dynamics of the aircraft, interference from gusts of wind, parameter uncertainty and environmental changes.

### **Conflict of Interests**

The author declare there is no conflict of interests related to the publication of this article.

## **REFERENCES**

- 1. Ismailov İ.M., Isaev M.M.** Principles of construction of intelligent aircraft control systems. *News of ANAS, Information and management problems*. Baku, 2018, pp. 16-27 (in Azerbaijani)
- 2. İsmayilov İ. M.** Interaction between human-machine interface and avionics on aircraft cockpit. *Problems of Information Society*, 2022, vol.13, no.2, 3–1 (in English)
- 3. İsmayilov İ.M., Binnatliyeva T.V.** The intellectual analysis algorithm of aircraft flight data. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. Vol 13. № 1. 2021. Pp.7-12 (in Azerbaijani)
- 4. Ismailov İ.M., Agamaliyeva J.** Application of intelligent technologies in modern pilotage-navigation complexes. *The Baltic Scientific Journals*. Proceedings of The International Research Education & Training Center. Vol. 16 No. 06 (2021),p.18-23. (in English)
- 5. Kirilkin V.S., Tsybova E.A.** Intelligent systems as a tool for a value-oriented aircraft management method. Magazine *"Management in Russia and abroad"* No. 1. 2012 (in Russian)
- 6.** [https://www.academia.edu/34939938/Cognitive\\_Human\\_Machine\\_Interfaces\\_and\\_Interactions\\_for\\_Unmanned\\_Aircraft?email\\_work\\_card=view-paper](https://www.academia.edu/34939938/Cognitive_Human_Machine_Interfaces_and_Interactions_for_Unmanned_Aircraft?email_work_card=view-paper)
- 7. Mohamed El-Saed M. Essa Mahmoud Elsisı Mohamed Saleh Elsayed Ahmed M. Elshafi.** Improvement of the predictive model for controlling the longitudinal flight of an aircraft based on intelligent technology. Department of Electrical Power and Machinery, Institute of Aeronautical Engineering and Technology (IAET) (in English)
- 8. İsmayilov İ.M., Binnatliyeva T.V.** Methods and Algorithms of Ensuring safety of flights in civil aviation. *International scientific and practical journal*. Endless Light in Science. Almaty Kazakhstan.2022 (in English)
- 9. Elsisı M., Ebrahim M.A.** Optimal Design of a Low-Computation Load SSDA-Based Predictive Control Model for a Dynamically Considered Autonomous Vehicle. *International J. Intel. Syst.* 2021. (in English)
- 10. Essa M.E., Aboelela S.M., Hassan M.A., Abdrabbo M.M.** Hardware in the loop of position tracing control of hydraulic servo mechanism. In Proceedings of the 2017 13th International Computer Engineering Conference (ICENCO) Cairo, Egypt, 27-28 December, 2017, pp. 160-165 (in English)

## **Increasing the Corrosion Resistance of Metal Through the Application of Fillers Based on Nanochalk and Nanotalc in Paint and Varnish Materials in Shipbuilding and Aircraft Industry**

**N.V. Fatyanova**

*Azerbaijan State Marine Academy (Z. Aliyeva st. 18, Baku, AZ1000, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Fatyanova Natalya / e-mail: nice.natali92@mail.ru

**Abstract**

The article examines the results of introducing a technology for increasing the corrosion resistance of metal in the shipbuilding and aircraft industry by adding chalk and talc nanopowders to fillers, as well as substantiating the rationality and economic efficiency of using chalk and talc nanoparticles in the production of paints and varnishes, discussing in detail the method of obtaining nanoparticles and the application of the obtained experimentally nanopowders for the preparation of a new type of enamel. Also, in connection with the trend towards ecologization, the article pays special attention to the environmental component of the production process, determines the degree of danger that the manufactured enamel poses to the environment and the human body.

**Keywords:** chalk nanoparticles, talc nanoparticles, corrosion, nanotechnology, paints and varnishes, shipbuilding, aircraft industry.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_15\_27

**Received** 21.12.2022

**Revised** 18.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Fatyanova N.V.*

[Increasing the Corrosion Resistance of Metal Through the Application of Fillers Based on Nanochalk and Nanotalc in Paint and Varnish Materials in Shipbuilding and Aircraft Industry]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 15-27 (in Russian)*

## **Gəmiqayırma və aviasiya sənayesində lak və boya örtüklərində nanotəbaşir və nanotalk əsaslı doldurucuların tətbiqi ilə metalın korroziyaya davamlılığının artırılması**

**N.V. Fatyanova**

*Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası (Z. Əliyeva küç., 18, AZ1000, Bakı, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Fatyanova Natalya / e-mail: nice.natali92@mail.ru

### **Xülasə**

Məqalədə dolduruculara təbaşir və talk nanotozlarının əlavə edilməsi yolu ilə gəmiqayırma və aviasiya sənayesində metalın korroziyaya davamlılığının artırılması texnologiyasının tətbiqinin nəticələri, habelə təbaşir və talk nanohissəciklərinin istehsalında istifadənin rasionallığı və iqtisadi səmərəliliyi əsaslandırılır, nanohissəciklərin alınması üsulu və əldə edilmiş eksperimental nanotozların yeni növ emalların hazırlanması üçün tətbiqi ətraflı müzakirə olunur. Həmçinin, yaşllaşdırma tendensiyası ilə əlaqədar olaraq məqalədə istehsal prosesinin ekoloji komponentinə xüsusi diqqət yetirilir, istehsal olunan emalların ətraf mühitə və insan orqanizminə yaratdığı təhlükə dərəcəsi müəyyən edilir.

**Açar sözlər:** təbaşir nanohissəcikləri, talk nanohissəcikləri, korroziya, nanotexnologiya, lak və boya örtükləri, gəmiqayırma, aviasiya sənayesi.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_15\_27

УДК 656.6:620.193; 656.6:620.197

## **Повышение коррозионной стойкости металла за счёт применения наполнителей на основе наномела и наноталька в ЛКМ в судо- и авиастроении**

**Н.В. Фатьянова**

*Азербайджанская государственная морская академия (ул. З.Алиева, 18, Баку, AZ1000, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Фатьянова Наталья / e-mail: nice.natali92@mail.ru

### **Аннотация**

В статье рассматриваются результаты внедрения технологии повышения коррозионной стойкости металла в судо- и авиастроении посредством добавления нанопорошков мела и талька в наполнители, а также обоснована рациональность и экономическая эффективность применения наночастиц мела и талька в процессе производства лакокрасочных материалов (ЛКМ), подробно рассмотрен метод получения наночастиц и применение полученных экспериментальным путём нанопорошков для приготовления эмалей нового типа. Также в связи с тенденцией на экологизацию в статье особое внимание уделяется экологической составляющей производственного процесса, определена степень опасности, которую представляет изготовленная эмаль для окружающей среды и организма человека.

**Ключевые слова:** наночастицы мела, наночастицы талька, коррозия, нанотехнологии, лакокрасочные материалы (ЛКМ), авиастроение, судостроение.

## Введение

В настоящее время существует немало различных методов защиты судов и авиаконструкций от обрастания и коррозии, однако одним из более надёжных и простых методов уменьшения процессов коррозии этих конструкций считается покраска поверхности лакокрасочными материалами (ЛКМ).

Коррозионные разрушения наносят непоправимый ущерб корпусу, трубопроводам и прочим конструкциям, так как вследствие коррозионного воздействия в местах, подвергающихся коррозионному разъеданию, металл становится тоньше, вследствие чего уменьшается плотность и прочность конструкций и корпуса в целом.

Коррозия (от лат. *corrosio* – «разъедание») – процесс самопро-извольного разрушения элементов, чаще всего металлов, под воздействием химического, электрохимического либо физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Коррозионные разрушения могут привести к остановке работы всей установки либо отдельного её элемента. Для устранения последствий коррозионных разрушений требуется выполнение дорогостоящих ремонтов.

Коррозия корпуса авиационных и судовых конструкций происходит под воздействием агрессивной среды (атмосферы и морской воды). Следует также учесть, что большая часть авиационных и судовых элементов и механизмов корпуса одновременно подвергается воздействию коррозионного разрушения и механического напряжения.

Кроме того, коррозионные разрушения наносят колоссальный материальный ущерб в связи с прямыми потерями (потери

металла). Однако косвенные потери гораздо выше прямых. К косвенным потерям относится экологический ущерб, а также ущерб жизни и здоровью человека.

В новом тысячелетии наметилась тенденция к росту потребления экологически безопасных ЛКМ, поэтому особое внимание в статье уделено вопросам воздействия процесса изготовления эмали на окружающую среду и организм человека.

В силу того, что эра нанотехнологий наступила сравнительно недавно – всего несколько десятков лет назад, на сегодняшний день мало разработок и исследований по рассматриваемой тематике. Поэтому данная работа представляется актуальной в аспекте применения нанотехнологий в производстве ЛКМ для судов и авиационных конструкций в целях повышения коррозионной стойкости металлических покрытий.

**Цель статьи** – дать сравнительный анализ физико-технологических свойств образцов красок с добавками кальцита, талька, наномела и наноталька; продемонстрировать преимущества применения наполнителей на основе наномела в изготовлении ЛКМ для судовых и авиаконструкций, благодаря которым обеспечивается повышение функциональных свойств без снижения их основных характеристик.

## Постановка задачи

Основными задачами являются:

- получение и анализ результатов процесса экспериментального получения нанопорошков мела и талька;
- разработка рационального состава ЛКМ с применением наполнителей на основе наномела и наноталька для повышения

коррозионной стойкости металла с целью применения полученных ЛКМ в судо- и авиастроении;

- доказание преимущественных характеристик эмалей на основе наномела в сравнении с эмалями на основе талька и наноталька;
- обоснование экономической эффективности промышленного получения наполнителя на основе наномела.

### **Решение задачи**

Для защиты и декоративной окраски изделий судо- и авиационной техники используются различные системы лакокрасочных покрытий (ЛКП), сочетающие последовательно нанесенные слои ЛКМ различного назначения. В системах лакокрасочных покрытий возможно сочетание многообразия свойств ЛКМ для повышения прочностных, адгезионных, антикоррозионных, защитных и декоративных характеристик покрытий [1].

Применение той или иной системы покрытий для внешних поверхностей изделий судо- и авиационной техники зависит от ресурса работы, назначения, условий эксплуатации. Долговечность, надёжность и декоративный вид покрытия определяются множеством факторов, таких как свойства ЛКМ, схема построения системы защитного покрытия, режим и условия формирования каждого из слоёв. В процессе получения эффективного, качественного покрытия каждый из перечисленных факторов в отдельности и все они вместе взятые имеют особое значение в процессе получения качественного ЛКП.

При разработке ЛКМ основной задачей является защита узлов и деталей конструкций судо- и авиационной техники от

пагубного воздействия окружающей среды. Поверхность металлических деталей одновременно подвергается сложному воздействию многих факторов. К таким факторам относятся: обширный диапазон перепадов температуры воздушной атмосферы, солнечная радиация, повышенное ультрафиолетовое излучение, эрозия, неизбежное воздействие в процессе эксплуатации горючих и смазочных веществ, а также других агрессивных жидкостей. Кроме этого, ЛКП должно выполнять декоративные функции.

ЛКП для судо- и авиационной техники, помимо основных свойств, таких как адгезия, коррозионная стойкость, физико-механические (эластичность, твёрдость, стойкость при ударе), защитные, декоративные свойства, должны обладать также функциональными свойствами – влагозащитными, атмосферостойкими, термостойкими, эрозионностойкими, антистатическими [2].

Коррозионное воздействие ЛКП приводит к возникновению дефектов плёнки данного покрытия и, соответственно, увеличивает проницаемость агрессивной среды к защищаемой подложке.

Функциональные ЛКП используют для защиты изделий от воздействия атмосферных и водных воздействий, химических реагентов, растворителей, моющих веществ, горючих и смазочных материалов, биологических факторов, для придания поверхности антистатических свойств, повышения твёрдости и износостойкости поверхности, временной защиты поверхности изделий при транспортировке и хранении.

Необходимо отметить, что ужесточение экологического законодательства, ограничивающего содержание растворите-

лей и иных токсичных компонентов в рецептурах, требует разработки экологически чистых ЛКМ [3]. При этом системы ЛКП должны обладать высокими защитно-декоративными свойствами для обеспечения долговременной защиты конструкций изделий судо- и авиационной техники.

На протяжении последних десятилетий научные исследования в области инновационных технологий доказывают целесообразность применения нанотехнологий для изготовления антикоррозионных красок. С применением нанонаполнителей открываются новые возможности для совершенствования технологии приготовления и повышения качества ЛКМ, поэтому разработка оптимальных составов ЛКП с применением высококачественных нанонаполнителей имеет важное научное и практическое значение.

Под нанотехнологиями понимается область прикладной и фундаментальной техники и науки, которая отображает совокупность теоретического обоснования, практических методов исследования, синтеза и анализа, производственных методов и применения продуктов с заданной атомной структурой посредством контролируемого манипулирования конкретными молекулами и атомами (приставка «нано» от греч. «nanos» обозначает одну миллиардную часть чего-л.).

Нанонаполнителями называются материалы, в матрице полимера которых распределены другие материалы и вещества, которые образуют области наномасштаба. Размер обособленных частиц этого материала находится в нанодиапазоне как минимум по одному измерению. Частицы нанонаполнителя преимущественно имеют размер менее 100 нм. Свойства композитов

определяются интенсивностью молекулярного взаимодействия между материалами матрицы и наполнителем, а также площадью поверхности раздела. Высокая удельная поверхность позволяет существенно снижать степень наполнения композита [4].

Оптимизация параметров синтеза наноразмерности наполнителя даёт возможность сократить его удельный расход и производить материалы, отвечающие более высоким требованиям. Нанонаполнители – это активные аддитивы нового поколения. Аддитивы – технологические добавки, облегчающие и ускоряющие смачивание подложки, диспергирование пигментов, устранение дефектов, отверждение на этапах изготовления, транспортирования, хранения ЛКМ и при формировании ЛКП.

Применение порошков и нанопорошков во многом зависит от их строения и проявляемых физико-химических свойств, поэтому их исследования являются актуальными на сегодняшний день.

### **Экспериментальная часть**

При помощи микроскопических исследований можно определить размеры, формы частиц, образование агломератов из частиц и т.д. Для определения взаимосвязи технологических, физических и химических свойств ЛКМ и свойств минеральных наполнителей был проведён микроскопический анализ.

Так, в качестве образцов наполнителей были взяты мел и тальк. Анализ образцов проводился в Институте геологии и геофизики при Министерстве науки и образования Азербайджанской Республики.

Микроскопические исследования проводились на программном микроскопе JEOL JSM 6610lv, предназначенном для

исследования морфологического, фазового, элементного состава и молекулярной структуры материалов и вещества. Микроскопический анализ мела показал, что мел является осадочной горной породой органического (зоогенного) происхождения. По результатам анализа химического состава мела было выявлено наличие СаО в составе в большом количестве (96,89%), а MgO в малом количестве (3,11%). Химическая формула мела  $\text{CaCO}_3$ . Минеральный состав мела схож с известняком, имеет мелкодисперсную морфологическую структуру. В составе мела нет примесей, он имеет микроскопический размер частиц.

Химический анализ талька показал, что он имеет крупнодисперсную структуру. Тальк представлен чешуйчатыми и листоватыми агрегатами, тонко-чешуйчатыми породами, таблитчатыми кристаллами или волокнистыми массами, плохо огранёнными и с трудом расщепляющимися на тонкие пластины. Химическая формула талька  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  или  $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . Тальк является минералом моноклинной сингонии. В составе талька присутствует в больших количествах оксид кремния  $\text{SiO}_2$  (65,57%) и оксид магния MgO (33,25%). Примеси в виде оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  представлены в сравнительно малом количестве. Таким образом, мы пришли к выводу, что тальк представлен не в чистом виде, так как в его составе обнаружены примеси. Размер частиц талька – микроскопический.

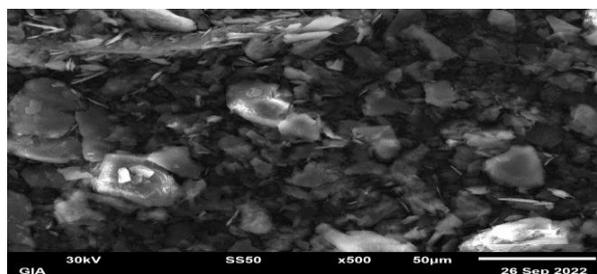
Тальк и мел значительно отличаются друг от друга по физико-химическим показателям и структурам своих кристаллических решеток, однако незначительно отличаются по размерам.

На сегодняшний день наиболее рас-

пространенным и производительным способом получения нанопорошков является тонкое механическое измельчение (диспергирование) материалов (от лат. *dispersio* – рассеяние). В промышленности и лабораториях для диспергирования твёрдых тел используют различные мельницы (вибрационные, струйные, шаровые, бисерные).

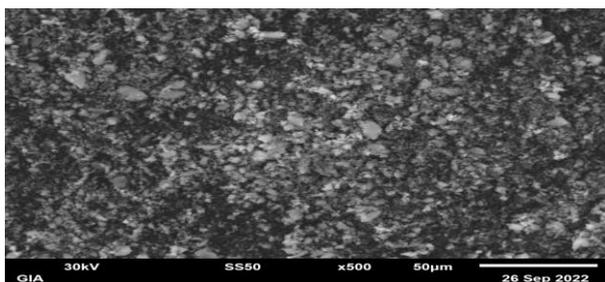
Повышение дисперсности может осуществляться посредством измельчения порошков в диспергационных мельницах. Поэтому оба образца (мел и тальк) были отправлены в Институт полимерных материалов при Министерстве науки и образования АР на помол в универсальную режущую экономичную вертикальную мельницу VLM-2. Данная мельница предназначена для измельчения образцов в лабораторных условиях.

Таким образом, испытуемые нами образцы мела и талька были измельчены до наночастиц. Был проведен микроскопический анализ, показавший, что нанотальк в размерах значительно уступает размерам наномела. Даже после помола талька не удалось добиться значительного уменьшения частиц и избавиться от игольчатой формы, тогда как мел за значительно меньшее время намного уменьшился в размерах своих частиц (рис. 1 и 2).



**Рисунок 1** – Морфологическое изображение наноталька

**Figure 1** – Morphological image of nanotalc



**Рисунок 2** – Морфологическое изображение наномела

**Figure 2** – Morphological image of nanochalk

Проведенные эксперименты показали, что только лишь через несколько часов сухого помола наблюдалось увеличение удельной поверхности частичек талька, в то время как мел в течении часа достигает требуемой удельной поверхности частиц. Так, при одинаковых условиях для мела требуется менее длительное диспергирование, чем для талька. Также необходимо отметить, что при измельчении частиц талька для улучшения качества диспергирования понадобилось добавление поверхностно активных веществ (ПАВ). Таким образом можно избежать явления самозалечивания трещин в частицах талька за счет адсорбции. Адсорбирующие вещества усилят действие разрушающих сил, но будут оказывать негативное влияние на окружающую среду, поскольку ПАВ могут высвобождать ионы тяжелых металлов. В отличие от талька, в меле такого не происходит. Было установлено, что при сухом помоле длительностью около часа обеспечивается достаточная дисперсность мела, тогда как тальк диспергируется в течении нескольких часов с добавлением ПАВ.

Для исследования составов и свойств ЛКМ на судоремонтном заводе «Биби-Эйбат» в лакокрасочном участке были созданы 3 образца судостроительной краски ПФ-115: 1-й образец - контрольный обра-

зец; 2-й образец - с наполнителем тальк; 3-й образец - с наполнителем наномел; 4-й образец - с наполнителем нанотальк.

Эмаль ПФ-115 была изготовлена в соответствии с ГОСТ 6465-76 [5] по рецептуре, приведённой в таблице 1.

Для проведения эксперимента в качестве подложки нами была выбрана сталь РСД-32, которая была окрашена всеми 4-мя эмалями (контрольным образцом, изготовленным на заводе «Биби-Эйбат» на основе мела, и тремя полученными нами образцами).

**Таблица 1** – Рецептура судовых ЛКМ на основе разных наполнителей

**Table 1** – Formulation of ship paints and varnishes based on various fillers

Составляющие компоненты	Вес составляющих компонентов
<b>Состав краски на основе наполнителя наномела</b>	
Лак ПФ-60	0,435
Диоксид титана (TiO <sub>2</sub> )	0,092
Наполнитель (наномел)	0,343
Растворитель	0,114
Катализатор	0,016
<b>Состав краски на основе наполнителя наноталька</b>	
Лак ПФ-60	0,435
Диоксид титана (TiO <sub>2</sub> )	0,092
Наполнитель (нанотальк)	0,343
Растворитель	0,114
Катализатор	0,016
<b>Состав краски на основе наполнителя талька</b>	
Лак ПФ-60	0,435
Диоксид титана (TiO <sub>2</sub> )	0,092
Наполнитель (тальк)	0,343
Растворитель	0,114
Катализатор	0,016

После предварительной очистки, обезжиривания и обработки стали все 4 образца были нанесены на стальные пластины и оставлены с целью затвердевания методом холодной сушки. После высыхания все образцы были опущены в морскую воду в целях фиксирования изменений, происходящих с каждым из образцов в есте-

ственных условиях. Исследования проводились нами на 60, 120 и 180-й день эксперимента. Сравнительный анализ физико-технологических свойств образцов красок с добавками кальцита, талька, наномела и наноталька проводился в Институте геологии и геофизики при Министерстве науки и образования АР.

Согласно проведённому сравнительному анализу эмалей было установлено, что эмаль на основе мела имеет однородную структуру благодаря тому, что частицы мела равномерно распределены в составе эмали, тогда как эмаль на основе талька имеет неоднородную структуру за счёт распределения в составе краски относительно большими кусками.

Исследование и последующий анализ 60, 120 и 180-дневных образцов подложек, окрашенных всеми 4 образцами эмалей показали, что на 60-й и 120-й день эксперимента поверхность образца стали, покрытой эмалью на основе наномела, имеет более мелкодисперсную структуру, эта эмаль более плотно прилегает к поверхности, не наблюдается вспучивания, в отличие от поверхности образца стали, покрытой эмалью на основе наноталька.

По результатам проведённого химического анализа было установлено, что в составе эмали на основе наноталька наличие оксида железа составляет 1,42%, что свидетельствует о протекании коррозии. Наличие коррозии в образце с наномелом на 60-й и 120-й день эксперимента не было зафиксировано. На 180-й день эксперимента для визуального сравнения всех четырёх образцов были сделаны фотографические снимки, на которых видно значительное превосходство образцов на основе мела и наномела по сравнению с образцами

на основе талька и наноталька. Образцы эмали на основе мела и наномела отличались меньшим вспучиванием, тогда как в образцах эмали на основе талька и наноталька наблюдались значительные признаки коррозии. Таким образом, были выявлены преимущественные характеристики эмали на основе мела и наномела, благодаря которым она обладает лучшей коррозионной стойкостью, чем эмаль на основе талька и наноталька (рис. 3 и 4).



**Рисунок 3** – Фоторграфический снимок 180-дневных образцов эмали на основе талька (слева) и мела (справа)

**Figure 3** – Photograph of 180-day-old talc (left) and chalk (right) enamel samples



**Рисунок 4** – Фотографический снимок 180-дневных образцов эмали на основе наноталька (слева) и наномела (справа)

**Figure 4** – Photograph of 180-day-old nanotalc (left) and nanochalk (right) enamel samples

Далее для определения адгезионных характеристик и коррозионной стойкости на электронном микроскопе JSM 6610LV были исследованы 180-дневные образцы, покрытые эмалями на основе мела, талька,

наномела и наноталька. По итогам микроскопического анализа было установлено, что эмаль на основе мела спустя 180 дней значительно отличается от поверхности, покрытой эмалью на основе талька.

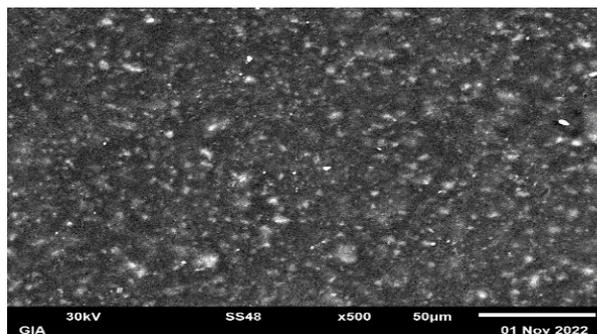
Поверхность стали, покрытой эмалью на основе мела, почти равномерно покрыта, наблюдается небольшое вспучивание, коррозия протекает незначительно, о чём свидетельствуют небольшие вкрапления ржавчины. На поверхности, покрытой эмалью на основе талька, краска отслоилась от поверхности, наблюдаются сильные вкрапления ржавчины, соответственно процесс коррозии протекает быстрее.

Химический анализ 180-дневных образцов, покрытых эмалями на основе мела, талька, наномела и наноталька, также показал, что процесс коррозии на поверхности, покрытой эмалью на основе талька, протекает значительно быстрее, чем на поверхности, окрашенной эмалью на основе мела. Хотя вкрапления оксида железа FeO появились на обоих образцах, однако на поверхности, окрашенной образцом на основе мела, коррозионный процесс протекает медленнее, чем на поверхности, покрытой ЛКМ на основе талька.

По итогам морфологического анализа также было выявлено, что поверхность, покрытая краской на основе наномела, имеет более мелкодисперсную структуру, более гладкая и краска равномерно распределена по поверхности (рис. 5 и 6).

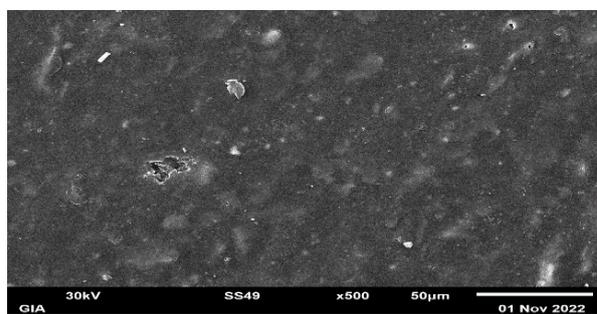
Химический анализ образцов показал незначительное количество оксида железа FeO в составе эмали на основе наномела, значит, процесс коррозии на поверхности окрашенной стали протекает медленнее, в отличие от процесса, происходящего на поверхности, окрашенной эмалью на осно-

ве наноталька. Это происходит благодаря тому, что наночастицы мела после диспергирования уменьшены до нужных наноразмеров. Измельчённый до такого размера мел в составе ЛКМ хорошо влияет на адгезионные и коррозионные свойства ЛКМ.



**Рисунок 5** – Морфологическая структура эмали ПФ-115 на основе наномела (180-дневный образец)

**Figure 5** – Morphological structure of PF-115 enamel based on nanochalk (180-day sample)



**Рисунок 6** – Морфологическая структура эмали ПФ-115 на основе наноталька (180-дневный образец)

**Figure 6** – Morphological structure of PF-115 enamel based on nanotalc (180-day sample)

Таким образом, согласно проведенным исследованиям, мы пришли к выводу, что благодаря технологическим, физическим и химическим свойствам мела и талька они могут использоваться в качестве наполнителя в составе ЛКМ и ЛКП. Однако мел и наномел, в отличие от талька и наноталька, полностью отвечают требованиям, которые предъявлены к ЛКМ.

Благодаря добавкам наномела установлено также повышение стойкости ЛКП к растрескиванию, улучшение свойств, придающих глянец эмали, улучшение реологических свойств эмали и повышение прочностных характеристик эмали при механическом воздействии, улучшение атмосферостойкости и влагостойкости ЛКМ, повышение химической и коррозионной стойкости ЛКМ. Уникальность мела обусловлена особенностями кристаллической структуры и пластинчатой формой частиц.

Наиболее важными свойствами наномела являются высокая белизна и мягкость, гидрофобность и органophilность, высокая термостойкость, химическая инертность и низкая электропроводность. За счёт мягкости наночастиц мела лакокрасочным материалам придаётся хорошая шлифуемость и обеспечивается низкий абразивный износ поверхности; гидрофобность и химическая стойкость наномела обеспечивает долговечность, антикоррозионную стойкость, а также улучшает внешний вид поверхности металла.

Пластичность наночастиц мела обеспечивает низкую водонепроницаемость, хорошую укрывистость и высокие характеристики прочности ЛКМ, повышается укрывистость, водостойкость и атмосферостойкость, усиливается химическая и коррозионная стойкость, регулируется матовость покрытия и вязкость композиции, улучшаются реологические характеристики ЛКМ.

Таким образом, экспериментально установленные преимущества подтверждают эффективность и целесообразность использования добавок наномела в составе ЛКМ, применяемых в авиа- и судостроительном производстве.

## Расчёт загрязняющих веществ от лакокрасочного производства

Поскольку производственная практика показывает, что большинство ЛКМ содержит в себе компоненты, которые способны оказать пагубное воздействие на окружающую среду и организм человека, нами был произведён расчёт загрязняющих веществ от производства изготовленных нами образцов.

При приготовлении краски из растворителей выделяются пары растворителей [6].

$$P^{\text{п}} = M_{\text{б}} \cdot \phi_{\text{л}} \cdot \delta_{\text{л}} \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

где  $M_{\text{б}}$  – количество компонентов, используемых при приготовлении краски;  $\phi_{\text{л}}$  – сумма летучих частей из ЛКМ, 7%;  $\delta_{\text{л}}$  – количество растворителя, выделившегося из смесителя, 3%;  $P^{\text{п}} = 1425,0 \text{ кг/г} = 1,4235 \text{ т/г}$ .

*Выделение веществ в виде паров растворителей за секунду:  $P^{\text{п}} = 0,075 \text{ г/сек}$*

В таблице 2 представлены количественные значения выделяющихся паров растворителей.

**Таблица 2** – Выделяющиеся пары растворителей  
**Table 2** – Emerging solvents

Ксилол	0,6785 т/г	0,0370 г/сек
Сольвент	0,4735 т/г	0,0220 г/сек
Уайт-спирит	0,2715 т/г	0,0160 г/сек

По степени воздействия на организм ксилол относится к 3-му классу опасности (умеренно опасные вещества), уайт-спирит и сольвент относятся к 4-му классу опасности (вещества малоопасные) по ГОСТ 12.1.007-76 [7].

## Пылевидные выделения

При добавлении в смеситель красок различных порошкообразных веществ

(мел, тальк и т.п.) эта зона принимается за источник интенсивного нелетучего пылеобразования.

Для расчета пылевидных выделений порошкообразных веществ используются данные, взятые для расчета пыли.

Объем пыли:

*Секундный выброс загрязняющего вещества:*

$$q = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_7 \cdot B \cdot G \cdot 10^6}{3600} \text{ г/сек} \quad (2)$$

где  $K_1 = 0,09$  – весовая доля пылевой фракции;  $K_2 = 0,06$  – доля пыли (от всей весовой пыли), переходящая в аэрозоль;  $K_3 = 1$  – коэффициент, учитывающий метеорологические условия (скорость ветра);  $K_4 = 0,1$  – коэффициент степени защищённости рабочего места от внешних воздействий (условия пылеобразования);  $K_5 = 0,7$  – коэффициент влажности материала;  $K_7 = 0,8$  – коэффициент крупности материала;  $B = 0,4$  – коэффициент высоты пересыпки;  $G = 0,083$  – суммарное количество перерабатываемого материала.

$$q = 0,00055 \text{ г/сек}$$

*Годовые выбросы пигментной пыли:*

$$Q = 0,000295 \text{ т/г}$$

По степени воздействия на организм пылевидные выделения относятся к 3-му классу опасности (умеренно опасные вещества).

Как показывают расчеты, выбросы, хотя и вредные и могут нанести вред как здоровью, так и окружающей среде, незначительны, эмаль относится к категории умеренно токсичных.

Сегодня одной из актуальных технологических проблем является повышение тонины помола сырья, создание многофункционального помольного оборудования, уменьшение затрат энергии при

нанопомоле.

Современное материальное производство основано на диспергировании, поскольку от свойств и качества порошка зависит материалоемкость, сложность и энергоёмкость всего производственного процесса [8].

Большие затраты электроэнергии на нанопомол обусловили многочисленные исследования, которые направлены на повышение рентабельности помольного оборудования и на разработку новейших устройств и методов получения нанопорошков. Исследования, направленные на улучшение качественных характеристик краски, в случае нахождения оптимальных вариантов, будут способствовать уменьшению затрат на ремонт, восстановление и замену авиа- и судовых металлических конструкций, вышедших из строя по причине разъедания ЛКП коррозией. Так может быть найден экономический баланс в данном вопросе.

Для получения микро- и наноталька одной из компаний, занимающихся научными исследованиями и разработками в области естественных и технических наук, было разработано и изготовлено технологическое оборудование. Целью проводимого анализа было определение целесообразности получения из талька частиц микро- и наноталька. Путём многочисленных экспериментов и расчётов целесообразность получения данных образцов была доказана. Однако перед нами стояла задача сравнения экономической эффективности получения частиц наномела с получением частиц наноталька.

Образцы наномела и наноталька были получены нами на лабораторном оборудовании. Для получения этих же образцов в

промышленных масштабах необходимо приобретение специального помольного оборудования.

На рынке Азербайджана представлено несколько компаний, предлагающих комплекс инжиниринговых услуг для предприятий лакокрасочной, химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, деревообрабатывающей, авиационной, автомобильной, пищевой, косметической, масложировой и фармацевтической промышленности. Благодаря характеристикам предлагаемого ими помольного оборудования нами была определена экономическая эффективность от процесса промышленного получения наномела.

**Таблица 3** – Сравнение показателей производительности и удельных затрат энергии для наноталька и наномела

**Table 3** – Comparison of performance indicators and specific energy costs for nanotalc and nanochalk

Производительность, т/час		Удельные затраты энергии, кВт/час/т		Стоимость помольного оборудования (комплект), ман	Мощность мельницы, кВт/час
нанотальк	наномел	нанотальк	наномел		
0,031	0,065	8,1	7,8	141 100	11

Таким образом, была доказана экономическая эффективность и подтверждены преимущества применения наполнителей на основе наномела в изготовлении ЛКМ для судовых и авиаконструкций. В судостроительной отрасли испытуемые ЛКМ могут применяться для покраски корпуса судна, а авиастроении – для окраски внешней поверхности самолётов в целях повышения коррозионной стойкости металла.

### Заключение

Согласно проведенным анализам был сделан вывод, что технологические, физические и химические свойства местного мела и талька свидетельствуют о том, что

Для определения экономической эффективности мы сравнили производительность наноталька с производительностью наномела, а также удельные затраты энергии, расходуемой на помол каждого из материалов. Сопоставим полученные значения (табл.3).

Так, практически при идентичных показателях удельных затрат энергии на помол наноталька и наномела производительность наномела более чем в 2 раза превышает производительность наноталька. Это обусловлено структурой мела, а также меньшим временем, затрачиваемым на получение наномела.

местные мел и тальк могут использоваться в качестве наполнителя в составе судовых и авиационных ЛКМ и ЛКП. В отличие от талька и наноталька, мел и наномел полностью отвечают требованиям, которые предъявлены к ЛКМ.

Основываясь на результатах проведенных испытаний, были установлены нижеперечисленные преимущества применения наномела в производстве судовых и авиационных ЛКП: высокая атмосферо- и влагостойкость покрытий; улучшенные защитные свойства; регулирование вязкости и матовости композиций; повышенная прочность покрытий; эффективное использование пигмента и высокая укрывистость; предотвращение образования трещин и

низкая потёчность при нанесении; улучшение реологических характеристик.

Обоснована экономическая эффективность и подтверждены преимущества применения наполнителей на основе наномела при изготовлении ЛКМ для судовых и авиационных конструкций.

Экологичность данных материалов достигается вследствие высокого содержания сухого остатка, т. е. снижения легколетучих органических соединений в их составе. Различные пигменты и добавки, применяемые в ЛКМ, в большей или меньшей степени содержат соединения тяжёлых металлов. Они могут содержаться в воздухе зоны покраски и приготовления в аэрозоле жидкого ЛКМ и оказывать серьёзное воздействие на человеческий организм.

Нами был произведён расчёт загрязняющих веществ от лакокрасочного производства. В соответствии с произведёнными расчётами выделяющихся из растворителей

их паров, а также расчётами пылевидных выделений, выявлено, что, хотя они и являются вредными и могут нанести вред как здоровью, так и окружающей среде, тем не менее они являются незначительными. Краска умеренно токсичная. Это подтверждается и требованием ГОСТ.

Состав красок подтвержден актом, подписанным начальником лакокрасочного участка судоремонтного завода «Биби-Эйбат». Результаты апробирования были заверены Актом использования результатов научно-исследовательской работы «Повышение коррозионной стойкости корпуса судна с применением нанонаполнителей в лакокрасочных покрытиях» и получения краски на их основе.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

#### **REFERENCES**

1. **Yakovlev A.D.** Lakokrasocniye pokritiya funksionalnoqo naznaceniya. Spb: Ximizdat, 2016. 272 s. (*in Russian*)
2. **Kondrashov E.K., Semyonova L.V., Kuznetsova V.A., Malova N.E., Lebedeva T.A.** Razviyiye aviacionnix lalokrasocnix materialov. Vse materiali. Ensiklopediceskiy spravocnik. 2012. №5. S.49-54. (*in Russian*)
3. **Kondrashov E.K., Kuznetsova V.A., Lebedeva T.A., Malova N.E.** Antikorrozionniye, termostoykiye, termorequliruyushiye i vlaqozashitniye pokritiya MKS «Buran». *Aviacionniye materiali i texnologii*. 2013. №5. S.137-141. (*in Russian*)
4. **Fatyanova N.V.** Modern methods of increasing the corrosion resistance of metal structures with the use of nanofillers in paint coatings in ship and aircraft // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 40-46 (*in Russian*)
5. **QOST 6465-76.** Emali marok PF-115, ix texniceskiye usloviya. Moskva, 1977, 14 s. (*in Russian*)
6. **Karpov Yu.A., Orlova V.A., Mironova I.V.** Analiticeskiy kontrol ekoloqiceskoy bezopasnosti LKP// Doklad Mejd. foruma «Analitiki i analitika». Voronej. 2004. T. 2, 556 s. (*in Russian*)
7. **QOST 12.1.007-76 SSBT.** Vredniye veshstva. Klassifikasiya i obshiye trebovaniya bezopasnosti, s.1. (*in Russian*)
8. **Kalinskaya V., Drinberq A.S., Itsko E.F.** Nanotexnologii. Primeneniye v lakokrasocnoy promishlennosti. – M.: OOO «Izdatelstvo «LKM-press», 2011. - 212 s. (*in Russian*)

## **Sedimentation and Diffusion of Nanofluids in Rotating Systems of Metal Friction Elements of Brake (*Part II*)**

**A.Kh. Janahmadov<sup>1,3</sup>, N.A. Volchenko<sup>2</sup>, M.Y. Javadov<sup>3</sup>, D.A. Volchenko<sup>4</sup>,  
A.S. Burava<sup>4</sup>, A.V. Prisyazhniy<sup>4</sup>, D.Yu. Zhuravlev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

<sup>2</sup>*Kuban State Technological University (International Activities Support Department, Room A-523, Moskovskaya st., 2, Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)*

<sup>3</sup>*Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

<sup>4</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Karpatska ave.15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)*

### **For correspondence:**

Zhuravlev Dmitriy / e-mail: dmytro.2103@ukr.net

### **Abstract**

For a capillary-porous body formed from nanoparticles, the following characteristics are determined: a differential distribution curve of pores and their total volume per unit volume of the body, the number of reduced cylindrical capillaries in a given cross section, and a capillary pressure curve. The latter are consistent with the thermodynamic relations of the displacement of the wetting phase. The regimes of fluid movement are established, when the accompanying forces are: inertia, capillary, gravitational. A mathematical description of diffusion-sedimentary processes in rotating metal friction elements of braking devices is given.

**Keywords:** band-shoe brake, friction pairs, brake pulley rim, nanoparticles, liquid, diffusion-sedimentation processes, molecular weight.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_28\_37

**Received** 14.01.2023

**Revised** 15.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

### **For citation:**

*Janahmadov A.Kh., Volchenko N.A., Javadov M.Y., Volchenko D.A., Burava A.S., Prisyazhniy A.V., Zhuravlev D.Yu.*

[Sedimentation and Diffusion of Nanofluids in Rotating Systems of Metal Friction Elements of Brake (*Part II*)]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 28-37 (in English)*

## Əyləclərin metal friksion elementlərinin fırlanan sistemlərinin nanomayelərində çökmə və diffuziya (II hissə)

Ə.X. Canəhmədov<sup>1,3</sup>, N.A. Volçenko<sup>2</sup>, M.Y. Cavadov<sup>3</sup>, D.A. Volçenko<sup>4</sup>,  
A.S. Burava<sup>4</sup>, A.V. Prisyajniy<sup>4</sup>, D.Y. Juravlev<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

<sup>2</sup> Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

<sup>3</sup> Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

<sup>4</sup> İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç.15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

**Yazışma üçün:** Juravlev Dmitriy / e-mail: dmytro.2103@ukr.net

### Xülasə

Məqalədə, nanohissəciklərdən ibarət kapilyar məsaməli cisim üçün aşağıdakı xüsusiyyətlər müəyyən edilmişdir: məsamələrin differensial paylanma əyrisi və onların cismin vahid həcminə düşən ümumi həcmi, verilmiş en kəsiyində verilmiş silindrik kapilyarların sayı, kapilyar təzyiq əyrisi. Verilənlər nəmlənmə fazasının yerdəyişmə prosesinin termodinamik əlaqələrinə uyğundur. Ətalət, kapilyar, cazibə qüvvələri zamanı mayenin hərəkət rejimləri müəyyən edilib. Əyləc qurğularının fırlanan metal sürtünmə elementlərində diffuziya-çökmə proseslərinin riyazi təsviri verilib.

**Açar sözlər:** lent-kündəli əyləc, sürtünmə cütü, əyləc qasnağı, nanohissəciklər, maye, diffuziya-çökmə prosesi, molekulyar çəki.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_28\_37

УДК 62.92.113; 621.2.082.18

## Седиментация и диффузия в наножидкости во вращающихся системах металлических фрикционных элементов тормозов (часть II)

А.Х. Джанахмедов<sup>1,3</sup>, Н.А. Вольченко<sup>2</sup>, М.Я. Джавадов<sup>3</sup>, Д.А. Вольченко<sup>4</sup>,  
А.С. Бурава<sup>4</sup>, А. В. Присяжный<sup>4</sup>, Д.Ю. Журавлев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

<sup>2</sup> Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

<sup>3</sup> Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

<sup>4</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

**Для переписки:** Журавлев Дмитрий / e-mail: dmytro.2103@ukr.net

### Аннотация

Для капиллярно-пористого тела, образованного из наночастиц, определены следующие характеристики: дифференциальная кривая распределения пор и их суммарный объем в единице объема тела, количество приведенных цилиндрических капилляров в заданном сечении, кривая капиллярного давления. Последние согласуются с термодинамическими соотношениями процесса вытеснения смачивающей фазы. Установлены режимы движения жидкости, когда сопутствующими силами являются инерции: капиллярные, гравитационные. Приведено математическое описание диффузионно-седиментальных процессов во вращающихся металлических фрикционных элементах тормозных устройств.

**Ключевые слова:** ленточно-колодочный тормоз, пары трения, обод тормозного шкива, наночастицы, жидкость, диффузионно-седиментационные процессы, молекулярный вес.

## Introduction

The results obtained are due to new approaches to the study of the properties of the system "nanocapillaries - nanofluid" in the chamber of the rim of the pulley of a band-shoe brake. When studying kinetic properties, this is primarily a rejection of established ideas about constant diffusion coefficients in a nanofluid, caused by the sedimentation of nanoparticles in a liquid.

**The analysis of literary sources and the state of the problem** are disclosed in the first part of the article. The main questions of the article: capillary-porous bodies formed from nanoparticles; diffusion-sedimentary processes in rotating systems; the discussion of the results.

**The purpose of the work** is to substantiate the performance of nanoparticles in capillary structures and in liquid in rotating brake systems.

**Capillary porous bodies formed from nanoparticles.** The main structural characteristic of capillary-porous bodies formed from nanoparticles is the pore distribution curve along its radius. The integral pore distribution curve characterizes the change in the relative pore volume  $V^*$  (ratio of pore volume to body volume) along the capillary radius  $r$ . Curve  $V^* = f(r)$  starts from some value  $r_{\min}$  (minimum capillary pore radius) and crosses the volume axis  $V^*$  with the value  $r = r_{\max}$ . Thus, within the limit  $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$  relative volume  $V^*$  increases continuously with increasing  $r$ . If in some area  $r_1 \leq r \leq r_2$  there is no such radius, then the curve  $V^* = f(r)$  turns into a straight line parallel to the axis  $r$ . Addition  $dV^*/dr = f_v(r)$

is called differential pore distribution curve or differential equation of pore volume characteristic [1, 2]. This curve can be obtained from the integral curve  $V^* = f(r)$  graphic differentiation method. The total volume of pores per unit volume of the body, equal to the porosity of the body, is determined by the relation

$$\Pi_v = V_{\max}^* = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV^*}{dr} dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f_v(r) dr. \quad (1)$$

Maximum liquid content  $\omega_{\max}$  will be equal to:

$$\omega_{\max} = V_{\max}^* \rho_l = \Pi_v \rho_l, \quad (2)$$

where  $\rho_l$  – liquid density.

The specific content of liquid, or its relative concentration (the mass of liquid in a porous body, referred to a unit mass of an absolutely dry body), is equal to:

$$u = \frac{1}{\rho_s} \omega = \frac{\rho_l}{\rho_s} \int_{r_{\min}}^r f_v(r) dr, \quad (3)$$

where  $\rho_s$  - density of an absolutely dry porous body.

To calculate the flow density of a liquid passing through a porous body composed of nanoparticles, the concept of a differential curve of the surface porosity of a body is introduced. Let the cross-sectional area of the body be  $1 \text{ cm}^2$ , part of this area is occupied by capillaries (doors), the rest is the substance of the body itself. If all capillaries are filled with liquid, then the resistivity is:

$$u = \frac{\int_0^L \rho_l A_l dL}{\rho_s \cdot 1 \cdot L}, \quad (4)$$

where  $A_l$  – the area occupied by the liquid, i.e. the area of all holes filled with liquid and located per  $1 \text{ cm}^2$  of the body section;  $L$  – depth (thickness) of the layer.

Let us denote the number of reduced cylindrical capillaries [3] in a given section, having a radius from  $r$  to  $r+dr$ , through  $dn_s$ , then the surface porosity (clearance) is equal to:

$$\Pi_s = A_l = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 \frac{dn_s}{dr} dr, \quad (5)$$

where  $n_s$  - the number of capillaries per unit area of the cross section of the body.

If  $A_l$  does not depend from  $L$ , that is surface porosity is the same in any section of the body, which is equivalent to the equality of the surface and bulk porosity of the body ( $\Pi_V = \Pi_S$ ), then you can write:

$$u = \frac{\rho_l}{\rho_s} A_l = \frac{\rho_l}{\rho_s} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 \frac{dn_s}{dr} dr. \quad (6)$$

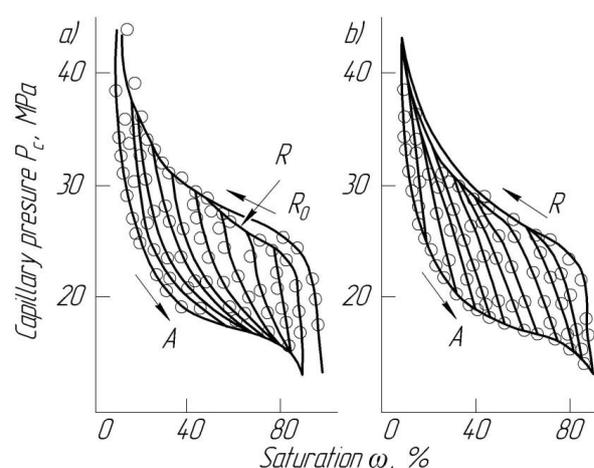
For many, especially for those rotating with a period  $\pi$ , the surface porosity of the body changes along the coordinates of the body, therefore, along with the differential volumetric characteristic of pores  $f_V(r)$  the differential surface characteristic of the pores is introduced  $f_S(r)$ , equal

$$f_S(r) = \frac{dA_l}{dr} = \pi r^2 \frac{dn_s}{dr}. \quad (7)$$

As an approximation, one can take  $\Pi_V = \Pi_S$ . One of the main structural characteristics of a porous body is the capillary pressure curve  $p_c = f(\omega)$ . In finely dispersed systems and capillary-porous bodies, the capillary pressure curves, being irreversible, are smooth and continuous, since discontinuities (a combination of rheons and isons) are insignificant and practically unobservable (Fig. 1).

This occurs because the capacity of the system (the porous body) is large compared to the volume of the liquid redistributed in the region of the rheon.

On the curves of capillary pressure distinguish: minimum saturation  $\omega_{li}$  (wetting phase volume corresponding to high capillary pressures), which is independent of further pressure increase; residual saturation  $\omega_{l0}$ , zero pressure; initial drying curve  $R_0$  (displacement of the wetting phase from 100% saturation to  $\omega_{li}$ ); absorption curve  $A$  (increasing saturation from  $\omega_{l0}$  to  $\omega_{li}$ ); secondary dehumidification curve  $R$ .



**Figure 1 a, b** – Capillary pressure hysteresis for microcapillaries with a diameter of 48  $\mu\text{m}$  (a) and 60  $\mu\text{m}$  (b)

Experimental data for many materials show that  $\omega_{li}$  same for primary and secondary dehumidification curves.

Secondary drying and soaking curves form a hysteresis loop  $RA$  with all subsequent reference points lying inside this loop. Primary dehumidification sweep curves that start at the absorption curve  $A$ , either meet at the intersection of the curve (Fig. 1b) or converge on the secondary drying curve in the area close to the intersection. The behavior of the absorption sweep curves is similar. Any point within the hysteresis loop can be obtained in many ways.

The regularities of the capillary pressure curves presented above agree with the

thermodynamic relations of the process of displacement of the wetting phase.

In the process of an intensive flow of liquid through a porous body, in addition to capillary and gravitational forces; Inertial forces are of great importance, which can be estimated by the Reynolds criterion (Re), Bond criteria (Bo) and Weber (We)

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta}; Bo = \frac{\rho g L^2}{\sigma}; We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma}, \quad (8)$$

where  $v$  - fluid velocity;  $L$  - characteristic size.

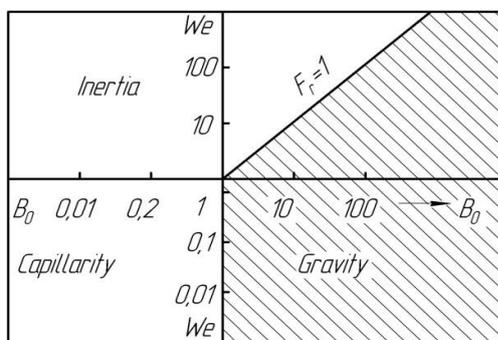
The Reynolds criterion characterizes the ratio of inertial forces to viscous forces, the Bond criterion - the ratio of gravitational forces to capillary forces, and the Weber criterion - the ratio of inertial forces to capillary forces.

Combining the criterion We and Bo, one can obtain the well-known Froude criterion:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \quad (9)$$

which characterizes the ratio of the forces of inertia to the forces of gravity.

There are modes when the dominant ones are: 1) inertia forces; 2) capillary forces; 3) gravitational. For small numbers We and Bo, the motion of the liquid is controlled by capillary forces (Fig. 2) and the effect of gravity can be neglected.



**Figure 2** – Schematic relation of inertial, gravitational and capillary forces during fluid flow through a porous body

For small Bo numbers, the We criterion determines the decisive role of capillary and gravitational forces. For large values of the criterion Fr, the effects of gravity can also be neglected.

In table shows the molecular weight of materials for nanoparticles, on which the forces acting on rotating volumes of nanofluid in the pulley chamber.

**Table** – Molecular weight of nanomaterials for nanoparticles

Nanoparticle materials					
SiC	Zn	Cu	ZnO	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Molecular weight					
40,1	65,4	69,55	81,41	227,03	502,06

### Diffusion-sedimentation processes in rotating systems.

Consider thermodynamic equilibrium in the pulley rim chamber, i.e., the case when all flows and thermodynamic forces are simultaneously equal to zero. This case is of practical importance in determining molecular weights from sedimentation. Forces acting per unit mass of a component in a system that rotates at angular velocity  $\omega$ , are described by a dependence of the form

$$(1 - \rho \mathcal{G}_k)(\omega^2 r + 2[\mathcal{G}\omega]) - (\text{grad} \mu_k)_{p,T} = 0 \quad (10)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n - 1),$$

where:  $\omega^2 r$  – centrifugal force ( $r$  – distance from axis of rotation);  $\rho$  – nanofluid density;  $2[\mathcal{G}\omega]$  – Coriolis force;  $\text{grad} \mu_k$  – entropy source intensity.

For a closed container, which is the pulley chamber, the speed  $\mathcal{G}_k$ , and hence the mass velocity  $\mathcal{G}$  are equal to zero at equilibrium. Therefore, (10) can be written in the form

$$(1 - \rho \mathcal{G}_k) \omega^2 r - (\text{grad} \mu_k)_{p, T} = 0 \quad (11)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n-1).$$

This relation makes it possible to describe the distribution of chemical components at sedimentary equilibrium. Consider first a binary mixture ( $n = 2$ ). Then from (11) we obtain

$$(1 - \rho \mathcal{G}_1) \omega^2 r - (\text{grad} \mu_1)_{p, T} = 0, \quad (12)$$

where the first factor can otherwise be written as i.e., expressed in terms of the difference in the partial specific volumes of the two components. The chemical potential gradient can be represented as a gradient of some parameter characterizing the mixture composition, for example  $n_1, c_1, N_1$  or  $\rho_1$  (their values will be presented later):

$$(\text{grad} \mu_1)_{p, T} = \left( \frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} \right)_{p, T} \text{grad} n_1 = \left( \frac{\partial \mu_1}{\partial c_1} \right)_{p, T} \text{grad} c_1 \quad (13)$$

etc.

Using these relations, we get

$$\frac{\text{grad} n_1}{n_1} = M_1 (1 - \rho \mathcal{G}_1) \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right)^{-1} \frac{\omega^2 r}{RT}. \quad (14)$$

$$\frac{\text{grad} c_1}{c_1} = M_1 \left\{ 1 - c_1 \left( 1 - \frac{M_2}{M_1} \right) \right\} \quad (15)$$

$$(1 - \rho \mathcal{G}_1) \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right)^{-1} \frac{\omega^2 r}{RT}.$$

$$\frac{\text{grad} \rho_1}{\rho_1} = \frac{\text{grad} N_1}{N_1} = M_1 (1 - \rho \mathcal{G}_1) (1 - c_1 \rho \mathcal{G}_1) \quad (16)$$

$$\frac{1}{n_2} \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right)^{-1} \frac{\omega^2 r}{RT}.$$

From here you can calculate the molecular weight  $M_1$ , if all other quantities are measured.

For ideal mixtures, for which the activity coefficient  $f_1 = 1$ , there is no multiplier containing this value. Then relation (14) reduces to the well-known Svedberg equation

[3] for determining the molecular weight  $M_1$  expressions on the left side (14) – (16) often considered equal to each other. It is clear from the foregoing which approximation this procedure corresponds to. In practice we usually have  $M_2 \ll M_1$ . Usually one deals with molar dilute solutions, so that  $n_2 \approx 1$ . If the solution is diluted so strongly that  $c_2 \approx 1$ , then the right sides of (15) and (16) are reduced to the right side of (11).

For  $n$ -component mixtures, using molar concentrations  $n_1$  as composition parameters, we obtain

$$\text{grad} \mu_j = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial \mu_j}{\partial n_i} \text{grad} n_i. \quad (17)$$

From the equilibrium condition (10), taking into account (17), we find ( $n - 1$ ) equations from which one can calculate ( $n - 1$ ) quantities  $n_i$ , determining the distribution of matter in the system. In this way, for an ideal mixture, when  $\mu_i$  is described by formula (14), we find

$$\frac{\text{grad} n_j}{n_j} = M_j (1 - \rho \mathcal{G}_j) \frac{\omega^2 r}{RT}. \quad (18)$$

Using (11) - (13), we express the gradients of mass concentrations in terms of gradients of molar concentrations:

$$\frac{\text{grad} c_j}{c_j} = \frac{\text{grad} n_j}{n_j} - \sum_{m=1}^{(n-1)} c_m \frac{M_m - M_n}{M_m} \frac{\text{grad} n_m}{n_m}. \quad (19)$$

Substituting (18) here, we obtain the relation which

$$\frac{\text{grad} c_j}{c_j} = \left\{ M_j (1 - \rho \mathcal{G}_j) - \sum_{m=1}^{n-1} c_m (M_m - M_n) (1 - \rho \mathcal{G}_m) \right\} \frac{\omega^2 r}{RT}, \quad (20)$$

determines the mass distribution of the ideal  $n$ -components of the mixture at sedimentation equilibrium.

Another method for determining molecular weights is to study the rate of sedimentation. Experimentally, in the chamber of the brake pulley, the sedimentation rate of the layer between the nanofluid and the pure liquid is measured. In this case, both fluxes and thermodynamic forces are nonzero. We have phenomenological equations with thermodynamic forces. In practice, the Coriolis force can be neglected; then for an isotropic system the tensors  $L_{ik}^a$  reduced to scalars  $L_{ik}^a$  and the phenomenological equations take the form

$$J_i^a = \sum_{k,j=1}^{n-1} L_{ik}^a A_{kj}^a \left\{ (1 - \rho \mathcal{G}_j) \omega^2 r - \sum_{m=1}^{n-1} \mu_{jm}^x \text{grad } x_m \right\} \quad (21)$$

$$\frac{1}{T} \quad (i=1, 2, \dots, n-1).$$

Introducing instead of the phenomenological coefficients  $L_{ik}^a$  diffusion coefficients  $D_{ik}^{bx}$ , we arrive at the following form of phenomenological equations:

$$J_i^a = \sum_{k,j=1}^{n-1} B_{ik}^{ab} D_{kj}^{bx} \left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (\mu^x)_{jm}^{-1} (1 - \rho \mathcal{G}_m) \omega^2 r - \text{grad } x_j \right\} \quad (22)$$

$$(i=1, 2, \dots, n-1).$$

For the case of binary mixtures ( $n = 2$ ), this equation takes the form

$$J_1^a = B_{11}^{ab} D^{bx} \left\{ (\mu^x)^{-1} (1 - \rho \mathcal{G}_1) \omega^2 r - \text{grad } x_1 \right\}. \quad (23)$$

Using (23) and choosing  $x = \rho_1$  and  $b_2 = \rho \mathcal{G}_2$ , we get

$$J_i^a = \frac{a_2}{\rho_2 \mathcal{G}_2} D \left\{ (\mu^\rho)^{-1} (1 - \rho \mathcal{G}_2) \omega^2 r - \text{grad } \rho_2 \right\}. \quad (24)$$

where  $D$  – diffusion coefficient. In a state far from equilibrium, the system is homogeneous in a large region between the boundary (separating solution and pure solvent) and the outer wall, i.e., we have  $\text{grad } \rho_1 = 0$ . Therefore, in this region (24) we write in this way:

$$J_1^a = \frac{a_2}{\rho_2 \mathcal{G}_2} D (\mu^\rho)^{-1} (1 - \rho \mathcal{G}_1) \omega^2 r. \quad (25)$$

With the help of dependencies (4-7), this ratio can be rewritten in the following form:

$$M_1 = \frac{|\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}^a|}{\omega^2 r} \frac{RTn_2}{D(1 - \rho \mathcal{G}_1)a_2} \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right); \quad (26)$$

this shows what quantities you need to know in order to calculate the molecular weight  $M_1$ . In particular, it is necessary to measure the first factor, which is sometimes called the sedimentation factor.

Useful results are obtained with two specific ways of choosing weights  $a_i$  and the corresponding frame speed  $\mathcal{G}^a$ . In the first case, as  $\mathcal{G}^a$  choose the average molar velocity  $\mathcal{G}^m$ . At the same time, the weight  $a_2$  equals  $n_2$ . Expression (26) then takes the form

$$M_1 = \frac{|\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}^m|}{\omega^2 r} \frac{RT}{D(1 - \rho \mathcal{G}_1)} \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right), \quad (27)$$

where  $R$  – gas constant;  $T$  – bulk temperature of the nanofluid.

This choice is convenient for molar diluted systems, since for such systems  $\mathcal{G}^m$  goes to zero. The second choice of practical interest is that we take  $a_2 = \rho_2 \mathcal{G}_2$ ; it means, that  $\mathcal{G}^a$  is the average volumetric velocity. In this case, excluding  $\mathcal{G}_2$  using the ratio  $\rho_1 \mathcal{G}_1 + \rho_2 \mathcal{G}_2 = 1$ , we find that (26) can be written in the form

$$M_1 = - \frac{|\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}^o|}{\omega^2 r} \frac{RTn_2}{D(1 - \rho\mathcal{G}_1)(1 - c_1\rho\mathcal{G}_1)} \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right). \quad (28)$$

It has been shown that the average volumetric velocity  $\mathcal{G}^o$  can be neglected in a number of important cases, in particular, if the system is a liquid enclosed in some vessel.

Just as it was done after relations (14) – (16), we can assume  $n_2 \approx 1$  or (if, as usual in experiments in the pulley rim chamber,  $(M_1 \gg M_2)$   $c_2 \approx 1$ , which is a tougher assumption. Then from (22) and (23) we obtain in the case of an ideal nanofluid ( $f_1 = 1$ ) Svedberg's famous expression:

$$M_1 = \frac{|\mathcal{G}_1|}{\omega^2 r} \frac{RT}{D(1 - \rho\mathcal{G}_1)}. \quad (29)$$

Equations (28) and (29) are valid in the region where one can neglect  $\text{grad } c_1$ . Practically  $|\mathcal{G}_1|$  measured by observing part of the boundary layer, the motion of which is also determined by equation (28) and (29).

Thus, we deduced how the Svedberg equation corresponds to the sedimentation velocity, and the limits of their applicability were determined. In particular, all the quantities for the nonequilibrium state are determined just as rigorously as for the case of the equilibrium state.

The process of sedimentation in multicomponent mixtures can be investigated using equation (22) [4 - 7]. As a scale  $a_k$  and  $b_k$  again it is convenient to choose  $\rho_k \mathcal{G}_k$ .

Then the speed  $\mathcal{G}^a$  represents the average volumetric velocity, which, as discussed above, can often be taken equal to zero. At the same time, using as parameters  $x_j$  density  $\rho_j$

for regions, where gradients  $\rho_j$  can be neglected, we obtain instead of (22)

$$\rho_i \mathcal{G}_i = \sum_{j=1}^{n-1} D_{ij} \left\{ \sum_{m=1}^{n-1} (\mu^\rho)_{jm}^{-1} (1 - \rho \mathcal{G}_m) \omega^2 r \right\} \quad (30)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n-1).$$

These equations make it possible to calculate molecular weights (similarly to the case of binary mixtures), if the necessary quantities included in the corresponding formulas are measured.

It has been shown above that diffusion coefficients can be used instead of phenomenological coefficients. Often, however, especially when considering systems that are in the field of external forces, completely different quantities, the so-called mobilities, are used instead of phenomenological coefficients. Below we show how the mobilities can be determined in the general case and how these quantities are related to the diffusion coefficients [8, 9].

Phenomenological equations have the form (24). Instead of transforming these equations to the form (25), we can write

$$J_1^a = \rho_i M_i \sum_{j=1}^{n-1} U_{ij}^a (1 - \mathcal{G}_j) \omega^2 r - \sum_{j, m=1}^{n-1} B_{ij}^{ab} D_{jm}^{bx} \text{grad } x_m \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (31)$$

where  $U_{ij}^a$  - are called nanoparticle mobility. They have units of speed per unit of force per mole (or  $N$  molecules). A comparison of this equation with (31) shows that the mobilities are related to the phenomenological coefficients as follows:

$$\frac{1}{T} \sum_{k=1}^{n-1} L_{ik}^a A_{kj}^a = \rho_i M_i U_{ij}^a \quad (32)$$

$$(i, j=1, 2, \dots, n-1).$$

When changing the main weights  $a_k$  the quantities on the right side of (32) are transformed in the same way as the flow  $J^a$  or diffusion coefficients  $D^{ax}$ . It should be noted that the mobilities are determined with respect to "arbitrary" velocities of reference systems  $\mathcal{G}^a$ , included in  $J_i^a$ , whereas the diffusion coefficients are defined relative to the "basic" velocity  $\mathcal{G}^b$ , whose choice is fixed. Eliminating the phenomenological coefficients from (32) [or comparing (31) with (32)], it is possible to establish a relationship between the mobilities of nanoparticles and diffusion coefficients:

$$\rho_i M_i U_{ij}^a = \sum_{k,m}^{n-1} B_{ik}^{ab} D_{km}^{bx} (\mu^x)_{mj}^{-1} \quad (33)$$

$(i, j=1, 2, \dots, n-1).$

This relationship is the generalized Fokker-Einstein relation. If you chose  $b_k = \mathcal{G}_k \rho_k$  and  $x_k = \rho_k$ , as in the previous cases, then relation (33) would take the form

$$\rho_i M_i U_{ij}^a = \sum_{k,m}^{n-1} B_{ik}^{a0} D_{km} (\mu^\rho)_{mj}^{-1} \quad (34)$$

$(i, j=1, 2, \dots, n-1).$

For binary mixtures ( $n = 2$ ) we have  $B_{11}^{a0} = a_2 / \rho_2 \mathcal{G}_2$ . Then the relation between the mobility  $U_{11}^a$ , which we denote simply by  $U^a$ , and the diffusion coefficient takes the form

$$\rho_1 M_1 U^a = \frac{a_2}{\rho_2 \mathcal{G}_2} D (\mu^\rho)^{-1}. \quad (35)$$

Taking into account [4-7], this relation can be written as:

$$D = \frac{n_2}{a_2} RTU^a \left( 1 + \frac{\partial \ln f_1}{\partial \ln n_1} \right). \quad (36)$$

For an ideal system, the activity coefficient  $f_1 = 1$ , so the resulting relation simplifies:

$$D = \frac{n_2}{a_2} RTU^a. \quad (37)$$

Finally, if we choose the "molar" description, when the weight factor  $a_2 = n_2$ , then we get

$$D = RTU^m, \quad (38)$$

i.e., the Fokker-Einstein relation.

We proceed to discuss the results obtained.

### The discussion of the results

Theoretical and experimental studies of non-uniform nanocapillary and nanofluid cooling of friction pairs of a model tape-shoe brake of a drawworks made it possible to state the following:

- a relationship has been established between sedimentation and diffusion in a nanofluid due to the intensity of the entropy source: sedimentation is assessed using the gradient theory when determining the sedimentation coefficient; diffusion of nanoparticles was characterized by the coefficient and their mobility in the liquid; the selection by molecular weight of various materials of nanoparticles was made;

- means providing local heat removal are briquettes made of nanoparticles from various materials and forming capillary structures resting in metal perforated frames; the latter are installed in three rows of different widths (circular grooves on the inner surface of the pulley rim, to which the fluid chamber is attached);

- it has been established that the thermal conductivity of nanoparticles in briquettes with different capillary structures does not go beyond a certain limit level with an increase in their concentration; the thermal conductivity coefficient of nanoparticles in briquettes is

some integral property of this non-standard two-phase system. has been justified.

### Conclusion

Thus, the workability of nanoparticles in capillary structures in rotating brake systems

### Conflict of Interests

The authors declare there is no conflict of interests related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. Tribology: friction, wear, lubrication / A.Kh. Janahmadov, A.I. Volchenko, K.T. Nabizade [et al.] // Baku: *Apostrophe-A*, 2019. 640 p. (in Russian)
2. Design and verification calculation of friction units of band-shoe brakes of drilling winches: Standard: A.Kh. Janahmadov, D.A. Volchenko, N.A. Volchenko [and others] // Baku: *Apostrophe*. – 311 p. (in Russian)
3. Reference book on tribotechnics. In 3 vols. T. 1. Theoretical foundations / ed. ed. M. Hebdy, A.V. Chichinadze. - Moscow: *Mashinostroenie*, 1989. - 400 p. (in Russian)
4. **Smirnov L.I., Goltsov V.A.** Dynamics of hydrogen concentration inhomogeneities in metals // *Physics of Metals and Metal Science*. - 1998. - T. 85, no. 2. - S. 19 - 23. (in Russian)
5. **Smirnov L.I., Goltsov V.A.** Equation of diffusion of interstitial atoms in metals at arbitrary concentration gradients // *Physics of Metals and Metal Science*. - 1998. - T. 85, No. 5. - Pp. 44 - 47. (in Russian)
6. **Barlag H., Opara L., Zuchner H.** Hydrogen diffusion in palladium based f.c.c. alloys // *J.A. Alloys and Compounds*. - 2002. - Vol. 330 - 332. - Pp. 434 - 437. (in English)
7. Progress in Hydrogen Treatment of Materials / Aoki K., Artemenko Yu. A., Borisov G. P. et al. Ed. V. A. Golstov. - Donetsk - Coral Gables: *Kassiopeya*, 2001. - 544 p. (in Russian)
8. **Volchenko N.A.** Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink / Volchenko N.A., Krasin P.S., Volchenko D.A., Voznyi A.V. // *IOP Conference Series and Engineering*, 2018, 327(3), 032059. (in English)
9. **Volchenko, N.A.** Pulse-contact frictional interaction of microprotrusions of friction pairs of brake devices / N.A. Volchenko, D.A. Volchenko, P.A., Polyakov, E.S Fedotov, A.S. Evchenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 560 (1), 012194. (in English)

## **The Stress Analysis in Pulleys and Blocks**

**S.Y. Aliyeva, I.M. Kerimova**

*Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Aliyeva Sevda / e-mail: sevda.aliyeva.66@bk.ru

**Abstract**

The article studies a three-dimensional finite element analysis of voltages in pulleys and describes the developed preprocessor for obtaining data for pulleys of various configurations. A model is constructed that takes into account the features of pulleys due to geometry and loads on the basis of eight nodal and twelve nodal isoparametric elements. When generating geometric data, the preprocessor needs twenty punch cards to produce a mesh of any of the seven types of pulleys selected for testing in the test lab. For a particular pulley under load, a very good agreement between the numerical and experimental results on deformations was obtained.

**Keywords:** three-dimensional finite element analysis, pulley, block, punch cards, voltage analysis.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_38\_50

**Received** 21.06.2022

**Revised** 14.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Aliyeva S.Y., Kerimova I.M.*

[The Stress Analysis in Pulleys and Blocks]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 38-50 (in Russian)*

## **Qasnaqlarda və bloklarda gərginliyin təhlili**

**S.Y. Əliyeva, İ.M. Kərimova**

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Əliyeva Sevdə / e-mail: sevd.a.aliyeva.66@bk.ru

### **Xülasə**

Məqalədə qasnaqlardakı gərginliklərin üçölçülü sonlu-element analizi təqdim olunub və müxtəlif konfigurasiyalı qasnaqlar üçün məlumatların alınması məqsədilə işlənib hazırlanmış preprocessor təsvir edilib. Səkkiz nodal və on iki nodal izoparametrik element əsasında həndəsə və yüklərə görə qasnaqların xüsusiyyətlərini nəzərə alan model qurulub. Həndəsi məlumatların generasiyası zamanı, sınaq laboratoriyasında tədqiqat üçün seçilmiş yeddi növ qasnaqdan hər hansı birinin torunu əldə etmək üçün preprocessorun iyirmi perfokarta ehtiyacı var. Yük altında olan konkret qasnaq üçün deformasiyalar üzrə ədədi və eksperimental nəticələr arasında çox yaxşı uyğunluq əldə edilmişdir.

**Açar sözlər:** üçölçülü sonlu-element analizi, qasnaq, blok, perfokart, gərginlik təhlili.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_38\_50

---

УДК 622.24

## **Анализ напряжения в шкивах и блоках**

**С.Я. Алиева, И.М. Керимова**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности*  
(пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

### **Для переписки:**

Алиева Севда / e-mail: sevd.a.aliyeva.66@bk.ru

### **Аннотация**

В статье представлен трехмерный конечно-элементный анализ напряжений в шкивах и описан разработанный предпроцессор для получения данных для шкивов различной конфигурации. Построена модель, учитывающая обусловленные геометрией и нагрузками особенности шкивов на основе восьми-узлового и двенадцати-узлового изопараметрических элементов. При генерации геометрических данных предпроцессору требуется двадцать перфокарт для получения сетки любого из семи типов шкивов, выбранных для исследования в испытательной лаборатории. Для конкретного шкива под нагрузкой получено хорошее согласие численных и экспериментальных результатов по деформациям.

**Ключевые слова:** трехмерный конечно-элементный анализ, шкив, блок, перфокарта, анализ напряжений.

## Введение

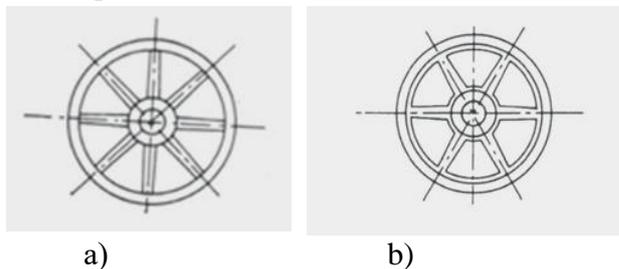
В силовых механических передачах часто используют шкивы и блоки различных форм и размеров. Обычно методы проектирования блоков основаны либо на опытных данных, либо на простейшем анализе напряжений. Другим известным примером является маховик, служащий для уменьшения колебаний частоты вращения, вызванных изменением крутящего момента. Размеры шкивов различны. Так, например, диаметр шкивов, производимых на заводах Пенсильвании [1], изменяется от 100 мм до 185 см. Имеются шкивы самых разнообразных геометрических форм, причем выбор конкретного типа шкива зависит от его назначения. Экспериментальных данных и литературы по проектированию шкивов недостаточно.

**Целью** статьи является получение данных для шкивов различной конфигурации, построение модели, учитывающей обусловленные геометрией и нагрузками особенности шкивов на основе восьми-узловой и двенадцати-узловой изопараметрических элементов.

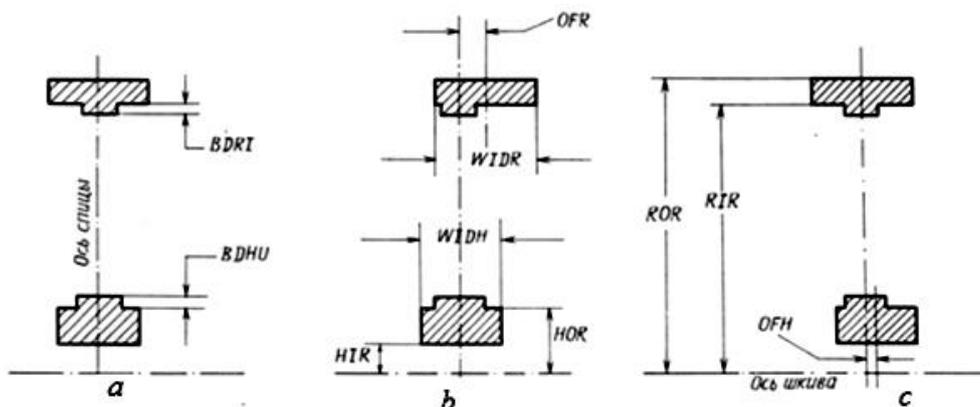
Если бы удалось определить более точно место и величину наибольших напряжений, можно было бы более рационально перераспределить материал и тем самым понизить стоимость и повысить эффективность проектирования. Обычные способы проектирования шкивов основываются либо на экспериментальных данных [2], либо на элементарном анализе напряжений [3].

## Решение задачи

Предлагается и подробно описывается конечно-элементный анализ напряжений шкива с полной ступицей колеса и со спицам, имеющими эллиптическую форму сечения. На рис. 1а и 1б показаны различные конфигурации шкивов, относящиеся к этой категории.



**Рисунок 1 а, б** – Модели: а) без буртов; б) с буртами  
**Figure 1 a, b** – Models: a) without collars; b) – Models with collars



**Рисунок 2 а, б, с** – Параметры сечения шкива  
**Figure 2 a, b, c** – Pulley section parameters

Рисунки 2 а, b, с иллюстрируют геометрические параметры, определяющие различные конфигурации шкивов.

Для выполнения собственно анализа напряжений существует программа общего назначения, основанная на конечно-элементном анализе SAPIV [4]. Для получения необходимых данных была разработана специальная программа-предпроцессор, совместимая с программой SAPIV.

**Описание и моделирование.** Метод конечных элементов [5] позволяет эффективно рассчитывать напряжения в узлах и деталях тел сложной формы при различных видах нагружения. Для краткости отметим только, что нами используется метод перемещений, подробно описанный в работах [5-7].

SAPIV – это программа общего назначения для анализа конструкций, основанная на методе конечных элементов и способная выполнять статический и динамический анализ пространственных конструкций больших размеров. Ее библиотека элементов состоит из элементов различных типов. Нами использован трехмерный элемент с переменным числом узлов.

Рисунки 1а и 1b показывают конфигурацию шкивов, для которых может быть выполнен анализ напряжений. Для них можно было бы построить простую модель с использованием балочных элементов. Однако балочные элементы не будут правильно описывать соединения между спицей и буртом обода, а также между спицей и буртом ступицы (рис. 1b и 2а), т. е. в наиболее опасных, как известно из опыта, местах. Неосесимметричность конструкции и эллиптическая форма сечений спиц дела-

ют невозможным использование плоских и осесимметричных элементов. Следовательно, остается выбрать трехмерный сплошной элемент.

Совместно с SAPIV можно применять два типа трехмерных элементов:

а) восьми-узловой элемент (кирпич) с учетом изгибных форм (тип b);

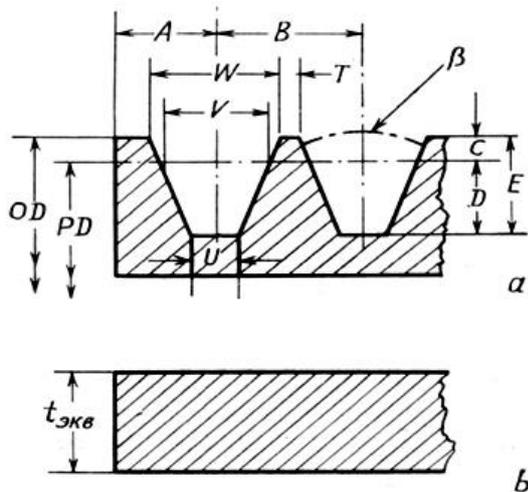
б) элемент с переменным числом узлов от 8 до 21 (тип с);

Подпрограммы программы SAPIV, соответствующие другим типам элементов (отличным от 1b и 2с), а также элементам динамического и временного анализа, удалены, чтобы сделать программу SAPIV более управляемой, особенно если она выполняется на микрокомпьютере, как в нашем случае.

**Параметры, определяющие модель шкива.** Для полного определения данной модели требуется следующая информация (рис. 2 а, b, с): внутренний радиус ступицы (HIR); внешний радиус ступицы (HOR); внутренний радиус обода (RIR); эквивалентный внешний радиус обода (ROR); смещение ступицы от оси спицы (OFH); смещение обода от оси спицы (OFR); высота бурта (BDRI); высота бурта на ступицы (BDHU); большая и малая оси эллиптического сечения спицы у ступицы; уменьшение размеров сечения (уклон) спицы у ступицы к ободу для большой и малой осей.

**Моделирование обода.** На рис. 3а показано сечение типичного желобка на ободу шкива, который служит для улучшения «эффективного коэффициента трения» [2, 3] между ремнем и ободом. Чем выше коэффициент трения, тем больший крутящий момент можно передать через шкив.

Для точного моделирования геометрии каждого желобка потребовалось бы очень большое число элементов. Было бы непрактично и неоправданно использовать такую подробную модель, поэтому сечение желобка моделируется эквивалентным прямоугольным сечением (рис. 3 б). Эквивалентность достигается сохранением изгибной жесткости относительно оси  $z$ . Сечение обода описывают несколько параметров (рис. 3 а).



**Рисунок 3 а, б** – Действительное сечение обода параметры, определяющие геометрические размеры канавок (а), а также эквивалентное сечение обода (б)

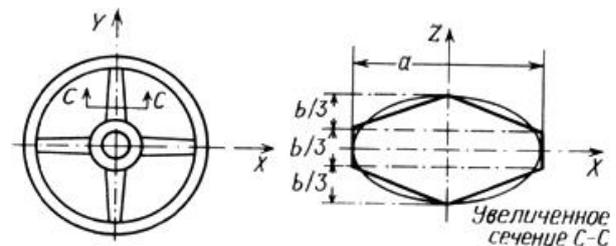
**Figure 3 a, b** – The actual section of the rim parameters, determining the geometric dimensions of the grooves (a), as well as the equivalent section of the rim (b)

Вычисление эквивалентного сечения, задаваемого этими параметрами, запрограммировано в предпроцессоре. Хотя изгибная жесткость обода и смоделирована должным образом, массу эквивалентного обода все же требуется уточнить, чтобы центробежные силы обоих ободов были также эквивалентны. Это достигается следующим образом:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho \left( \frac{A}{A_{\text{экв}}} \right) \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{экв}}$  – эквивалентная массовая плотность, соответствующая эквивалентному сечению обода;  $A_{\text{экв}}$  – площадь сечения эквивалентного обода;  $\rho$  – действительная массовая плотность;  $A$  – площадь сечения эквивалентного обода.

**Моделирование спиц.** Эллиптическое сечение спиц моделируется двумя трапециями, имеющими общее основание. На рис. 4 показана практическая эквивалентность между действительными модельными сечениями. При этом существует некоторая разность между изгибными жесткостями этих сечений относительно оси  $z$ .



**Рисунок 4** – Практическая эквивалентность между действительными модельными сечениями

**Figure 4** – Practical equivalence between real model sections

Хотя трапецевидная идеализация несколько занижает фактическую жесткость (менее чем на 9%), имеет место компенсирующий эффект, состоящий в том, что перемещения в методе конечных элементов обычно дают несколько завышенную жесткость конструкции [5].

**Конечно-элементная модель.** Типичный шкив условно состоит из блоков спиц и ободов (рис. 5 а, б, с и рис. 6 а, б, с, d). Блок спицы моделируется с использованием восьми-узловых элементов, а блок обода – двенадцати-узловых элементов.

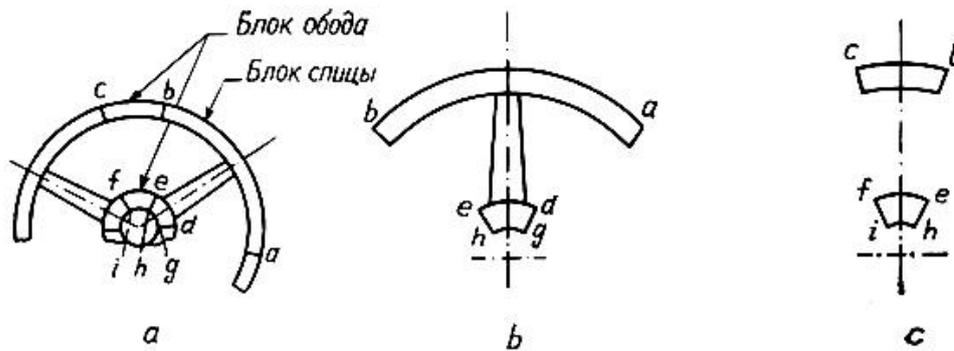


Рисунок 5 a, b, c – Типичные блоки для моделей: а – шкив, состоящий из блоков; b – блок спицы; c – блок обода

Figure 5 a, b, c – Typical blocks for models: a - pulley, consisting of blocks; b - spoke block; c – rim block

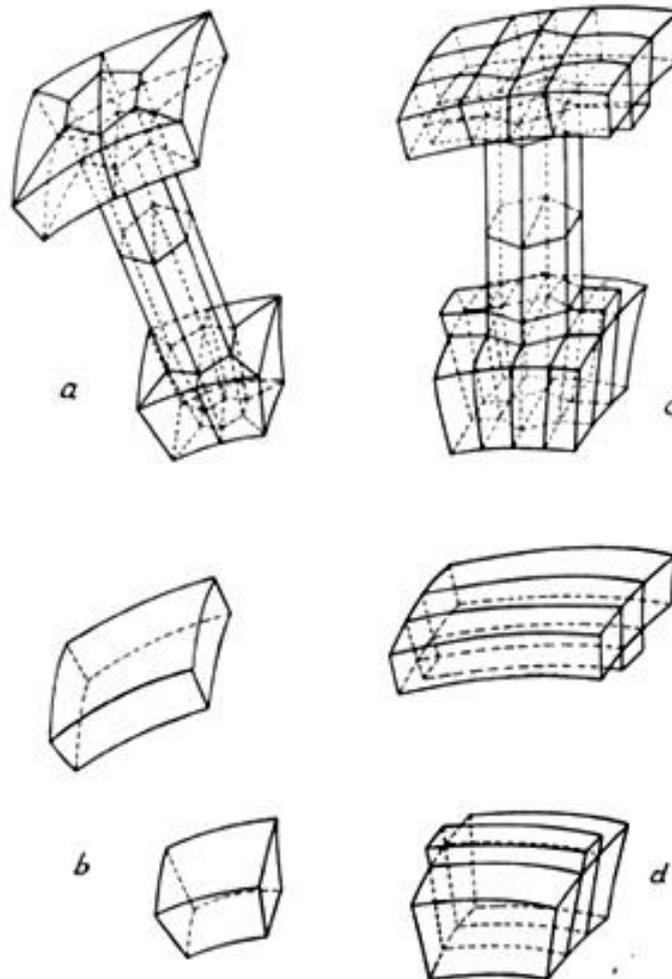


Рисунок 6 a, b, c, d – Конечно-элементная модель блоков

Figure 6 a, b, c, d – Finite element block model

На рис. 6 *a, b, c, d* показана конечно-элементная модель блоков, изображенных на рис. 5 *b* и *c* соответственно. Полный шкив моделируется путем систематического и поочередного объединения этих блоков. Фактические номера блоков зависят от особенностей рассматриваемой модели.

**Нагружение.** Шкивы обычно несут следующие нагрузки:

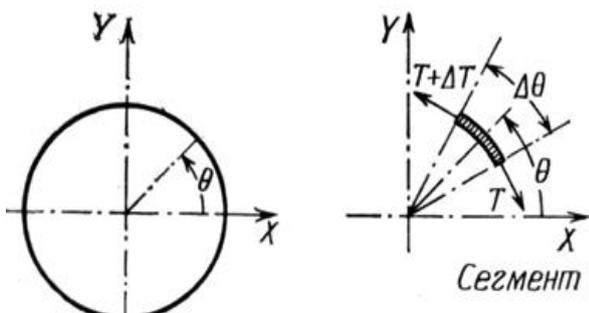
*a) Нагрузка, передаваемая от ремня.*

Напомним, что обод составлен из сегментов, принадлежащих либо спицам (восьмиузловой элемент), либо ободу (двенадцатиузловой элемент).

Нагрузка от ремня для произвольного угла  $\theta$  (рис. 7) дается выражением [3]:

$$T = T_1 \exp(-\mu\theta) \quad (2)$$

где  $\mu$  и  $T_1$  обозначают, соответственно, коэффициент трения и усилие растяжения на натянутой ветви.



**Рисунок 7** – Нагрузка от ремня для произвольного угла  $\theta$

**Figure 7** – Belt load for an arbitrary angle  $\theta$

При моделировании этой нагрузки силу натяжения ремня на данном сегменте принимают постоянной и соответствующей середине угла на этом сегменте. Полные нагрузки, передаваемые от ремня к сегменту по осям  $X$  и  $Y$ , вычисляются в соответствии с уравнениями:

$$X = (-T_1 \Delta\theta \sin\theta - \mu T_1 \Delta\theta \cos\theta) \exp(-\mu, \theta) \quad (3)$$

$$Y = (-T_1 \Delta\theta \cos\theta + \mu T_1 \Delta\theta \sin\theta) \exp(-\mu, \theta) \quad (4)$$

где  $X$  – сила в горизонтальном направлении,  $\theta$  – угловая координата,  $\Delta\theta$  – центральный угол сегмента.

Эти суммарные нагрузки распределяются по узлам на поверхности сегмента в соответствии с методикой [5] и вычисляются с учетом весовых коэффициентов в соответствующих точках для моделей с буртом и без бурта.

*б) Центробежные нагрузки.* Центробежные нагрузки, возникающие при вращении шкива, преобразуются в эквивалентные сосредоточенные узловые силы. Суммарная нагрузка для элемента в радиальном направлении дается выражением:

$$R = (\rho dv) \bar{r} \omega^2 \quad (5)$$

Предполагается, что вся масса элемента сосредоточена в его центре тяжести. Радиальная сила, сосредоточенная в центре тяжести, распределяется по узлам элемента пропорционально значениям функций формы, т. е.

$$R_i = \int_V N_i R dv, \quad i = 1 \dots, M \quad (6)$$

Здесь  $R$  – радиальная сила,  $\rho$  – массовая плотность,  $\bar{r}$  – радиус центра тяжести элемента,  $\omega$  – угловая скорость,  $v$  – объем,  $R_i$  – радиальная сила, приложенная в узле  $i$ ,  $N_i$  – функция формы  $i$ -го узла,  $M$  – число узлов в элементе.

Эта радиальная нагрузка раскладывается затем по осям  $X$  и  $Y$ . Указанные шаги должны быть включены в подпрограмму соответствующего элемента программы SAPIV.

**Предпроцессор.** В зависимости от располагаемых компьютеров и машинного времени можно сформулировать довольно эффективные предпроцессоры. Мы опишем простой предпроцессор, написанный на языке Фортран и предназначенный для считывания параметров рис. 1 и 4, а также нагрузок типа *a)* и *b)* и формирования файла данных для программы SAPIV. Программа выполняется в пакетном режиме. Предпроцессор данных работает следующим образом:

*a) Связность элементов по узлам и координаты.* Подпрограммы генерации всех данных для блока, представляющего спицу или обод, выдают информацию его правой поверхности; эта информация уточняется после выхода из блока. В зависимости от порядка следования блоков (обод или спица) эти подпрограммы вызываются попеременно. Соответствующие обращения объединяются в подпрограмму, которая формирует модель каждого типа шкива. Такие подпрограммы вызываются из библиотеки подпрограмм, которая зависит от числа типов шкивов, выбранных пользователем.

Осевая линия первой спицы всегда имеет нулевой угол  $\theta$ . Данные генерируются в направлении против часовой стрелки. Генерация координат производится в цилиндрической системе координат  $R, \theta, Z$ , которая затем преобразуется в ортогональную систему координат  $X, Y, Z$ . Очевидно, что при такой схеме нумерации узлов получается большая ширина полосы. Уменьшение ширины полосы и соответствующее снижение стоимости вычислений достигаются перенумерацией узлов. Схема перенумерации очень проста,

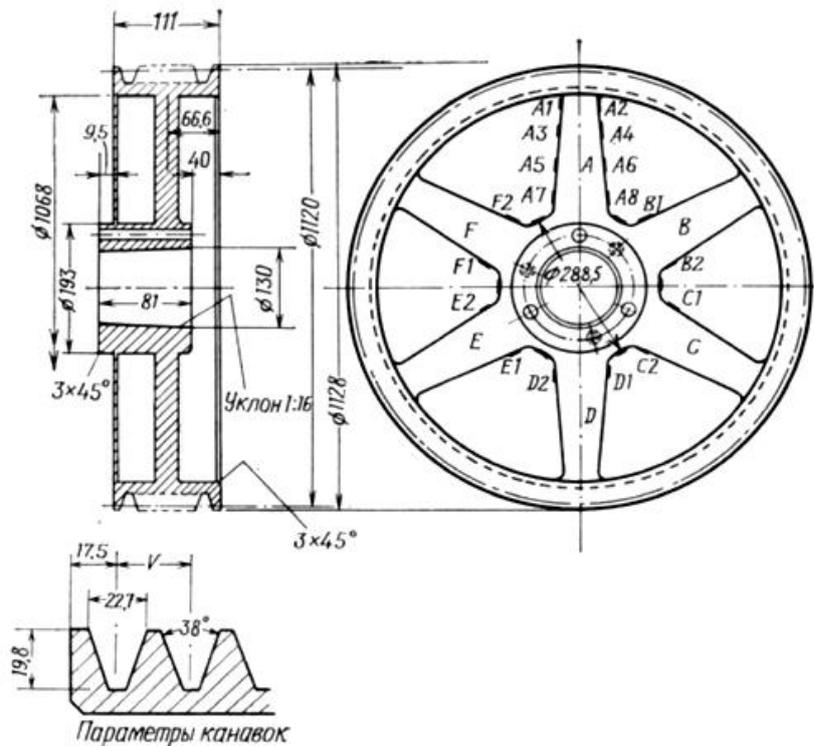
и мы не пытались найти оптимальную схему.

*б) Свойства материала.* Для модуля Юнга, коэффициента Пуассона и массовой плотности берутся стандартные значения, если пользователь не хочет задавать их. Все свойства берутся для изотропного материала.

*в) Данные о нагрузках.* Информация о нагрузках от действия ремня вводится для каждого последовательного сегмента. Нумерация сегментов соответствует нумерации блоков спиц и обода на рис. 7.

Для каждого сегмента, подверженного действию ремня, задается угол  $\theta$ , угловой размер  $\Delta\theta$  и параметр, определяющий, действует ли нагрузка на вес сегмент. Последний параметр используется в основном для первого и последнего сегментов области воздействия ремня. Если значение угловой скорости не задано пользователем, оно применяется равным  $33,02 \text{ М/с}$ . При подготовке данных используется понятие макрокарт. Сначала идентифицируются признаки каждого типа данных как мнемонические переменные, состоящие из четырех букв. Это обеспечивает большую гибкость при сборке данных. Чтобы избежать генерации данных и последующей работы программы SAPIV при ошибочной входной информации, сразу же после ввода данных производится ряд контрольных операций. Если встречаются ошибочные данные, то выполнение программы немедленно прекращается с последующим сообщением об ошибках.

**Пример подготовки данных для предпроцессора.** На рис. 8 показан пример шкива, для которого выполнялись статические испытания.



**Рисунок 8** – Размеры и обрядка датчиками чугунного шкива, прошедшего статические испытания  
**Figure 8** – Dimensions and order of gauges of cast iron pulley that has passed static tests

Пример подготовки исходных данных для аналитической модели приведен на рис. 9.

Ниже представлено краткое описание этих данных:

*a)* первая карта-заголовок идентифицирует решаемую задачу; длина заголовка не более 80 символов;

*б)* карта SPOKE задает параметры блока спицы, показанного на рис. 10а;

*с)* карта RIM задает параметры блока обода, показанного на рис. 10б;

*д)* карта ROTA задает желаемую ориентацию шкива.

Напомним, что генерация данных начинается при расположении осевой линии первой спицы под углом  $\theta = 0^{\circ}$  (рис. 10с);

*е)* карты BDRI и BDHU определяют высоту буртов на ободу и ступице соответ-

ственно; таким образом можно изучить влияние переменной высоты буртов.

*ф)* карты BELT определяют нагрузку от ремня, причем сегменты 1-5 загружены полностью, а сегменты 6 и 12 загружены наполовину (рис. 10д);

*г)* карта RIMCS задает параметры сечения обода (рис. 4);

*h)* карта CROSS-SECTION задает размеры сечения спицы у ступицы;

*и)* карта TAPER определяет конусность для большой и малой осей эллипса спицы. Отсутствие этих данных означает отсутствие конусности;

*ж)* карта RPM задает угловую скорость;

*к)* карта RUN является признаком входа в предпроцессор данных.

Пример подготовки данных для предпроцессора:

```

**TEST CASE ** MODEL 7 ** WITH BEAD **

MODEL
  7
SROKE
2.575      4      3.1875      0.53125  50.0      30.0
RIM
21.0625    21.53  4.375      0.0      10.0      30.0
ROTA
  30.0
BDRI
  0.20
BDHU
  1.6875
BELT
1000.0      300.0
  1      30.0      30.0
  2      60.0      30.0
  3      90.0      30.0
  4      120.0     30.0
  5      150.0     30.0
  6      180.0     30.0      1
 12      0.00      30.0      -1
RIMCS
0.687      0.5      0.78      0.1575     26.75     0.3578     0.8950
CROSS - SECTION
2.500      1.350
TAPER
  0.833
RPM
  0000.1
RUN
END
    
```

Рисунок 9 – Пример подготовки данных для предпроцессора  
 Figure 9 - An example of preparing data for the preprocessor

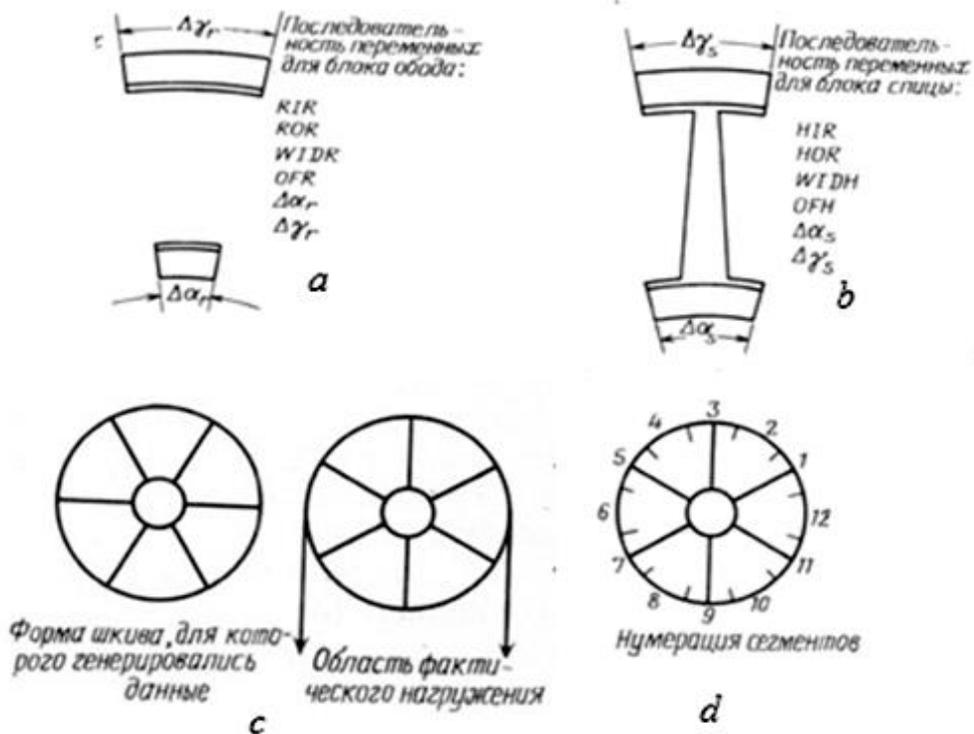


Рисунок 10 a, b, c, d Схемы генерации данных от начала первой осевой линии под углом  $\theta = 0^\circ$   
 Figure 10 a, b, c, d – Schemes for generating data from the beginning of the first axial line at an angle  $\theta = 0^\circ$

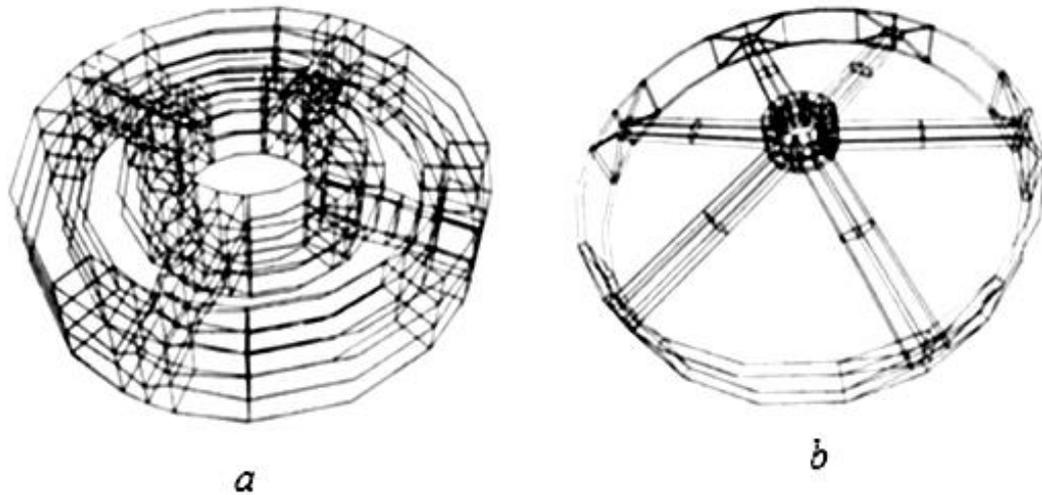


Рисунок 11 а, б – Примеры вычерчивания сеток  
Figure 11 a, b – Examples of drawing grids

**Программа вычерчивания геометрии.** Для того чтобы обеспечить контроль больших массивов данных и связности узлов и координат, разработана простая программа построения аксонометрических трехмерных конечно-элементных сеток. Она основывается на пакете графических программ, разработанном в вычислительном центре Пенсильванского университета. На рис. 11а и 11б показаны примеры вычерчивания сеток. Рис. 11 б соответствует шкиву, для которого были получены экспериментальные данные.

**Пример сравнения вычислительных и экспериментальных результатов.** Выше на различных этапах моделирования были сделаны некоторые допущения и упрощения, например аппроксимация геометрии восьми-узловыми элементами (рис. б), упрощения при вычислении усилий от ремня, введение эквивалентного сечения желоба обода (рис. 3а), моделирование эллиптического сечения спицы (рис. 4) и т. д.

Поэтому для определения точности моделирования желательно сравнить результаты, полученные при численном моделировании с экспериментальными данными.

На рис. 8 изображен шкив, для которого выполнялись статические испытания. Точки, в которых напряжения определялись с помощью тензодатчиков, показаны на рис. 8. Учитывалось только усилие от ремня, причем натяжение ремня с разных сторон шкива составляет  $T_1 = 4449$  Н и  $T_2 = 1335$  Н. Определенные таким образом два усилия и угол контакта  $\theta$  ремня со шкивом полностью определяют нагрузку, передаваемую от ремня, и необходимость задания коэффициента трения отсутствует.

Для нашей статической задачи все узлы на внутренней поверхности ступицы зафиксированы, т. е. не учитывается нагрузка, обусловленная посадкой. Несложно определить также и другие граничные условия.

В таблице приведены теоретические и экспериментальные значения деформаций.

**Таблица – Сравнение деформаций**  
**Table – Comparison of deformations**

Расположение точек	Данные эксперимента	Численное решение (модель с буртами)	Численное решение (модель без буртов)
A	Между +64(A5) и +75(A7)	+75,6	+91,3
A	Между -52(A6) и -101(A8)	-91,3	-109,4
A	Между -20(A1) и +20(A3)	-28,1	-30,6
A	Между -10(A2) и -46(A4)	+2,2	+10,9
B	Менее +115(B1)	+85,2	+91,3
B	Менее -111(B2)	-105,2	-115,9
C	Менее +128(C1)	+117,3	+123,1
C	Менее -118(C2)	-105,3	-110,0
D	Менее +100(D1)	+91,0	+104,6
D	Менее -82(D2)	-77,6	-91,2
E	Менее +76(E1)	+90,3	+98,0
E	Менее -62(E2)	-77,5	-91,4
F	Менее +66(F1)	+77,5	+91,3
F	Менее -75(F2)	-84,3	-104,6

Места измерения напряжений на шкиве тензодатчиками не совпадают с теми точками, для которых были получены теоретические значения. Следовательно, экспериментальные значения, соответствующие теоретическим точкам, должны лежать между двумя соседними измеренными экспериментальными значениями или быть меньше экспериментального значения в ближайшей точке. Такая методика принята вместо интерполяции, чтобы сохранить экспериментальные данные в исходной форме. При этом мы исходим из допущения о том, что напряжения изменяются между последовательными точками монотонно. Отметим, однако, что при желании можно вычислять деформации в местах измерений. В таблице приведены результаты двух численных решений: одно соответствует форме фактически испытанного шкива с буртами, а другое - шкиву без буртов.

В таблице показано согласие по деформации для всех точек, кроме одной. Очень хорошо согласуются и закономерности изменения деформаций, кроме одной. Вероятно, преждевременно утверждать, что точность модели достаточна для всех типов нагрузок, однако она удовлетворительна

для данного частного случая нагружения. Подтверждено также, что можно сделать необходимые упрощения при моделировании задачи без потери значимости результатов, при условии правильности допущений. Хотя динамические испытания шкивов еще только начались, можно ожидать, что получаемые в них экспериментальные значения деформаций также будет хорошо согласовываться с расчетными.

Благоприятное влияние подкрепления шкива буртами на ступице хорошо видно из аналитических результатов, приведенных в таблице.

### Заключение

В распоряжении конструктора появился мощный и эффективный инструмент – предпроцессор, позволяющий конструктору выполнить целую серию расчетов для исследования влияния различных конструктивных параметров. Такой подход должен, по существу, заменить обычный способ проектирования, использующий дорогостоящие испытания прототипа в поисках усовершенствованной конструкции.

На практике для уменьшения концентрации напряжений применяются галтельные переходы между ступицей и спи-

цей, а также между спицей и ободом. Детальное моделирование галтельных переходов требует большого числа элементов и соответствующего увеличения стоимости вычислений.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

### **REFERENCES**

1. **Kerimov Z.G.** Detali mashin i gruzopodemnye transportnye mashiny. Baku: Vysshaya shkola, 2002. - 596 s. (*in Russian*)
2. **Mamed-zade O.A.** Programmirovaniye raschetov detalej mashin. Baku, 2003 (*in Russian*)
3. Mechanical Power Transmission Equipment, Wood's General Catalog, T.B. Wood's Sons Co., Chambersburg, Penn., 1980 (*in English*)
4. **Kerimov Z.G.** i dr. Proekt iz detalej mashin. Kursovaya. Baku, 2007 (*in Russian*)
5. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.O., Javadov M.Ya., Zhuravlev D.Yu., Andrejchikov Ye.Yu., Nischuk V.V., Volchenko N.A., Yevchenko A.S.** Hydrogen wear of friction pairs of band-shoe brake. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, Vol. 15, No. 1, 2023. - Pp. 43-54. (*in English*)

## **Distinctive Features of Raman Spectroscopy of Crude Oils of the Absheron Peninsula**

**A.M. Pashayev<sup>1</sup>, N.A. Valiyev<sup>2</sup>, K.E. Asgerov<sup>1</sup>, A.A. Musayev<sup>1</sup>,  
I.Kh. Mammadov<sup>1</sup>, K.R. Allahverdiyev<sup>1</sup>, I.Z. Sadikhov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ 1045, Azerbaijan)*

<sup>2</sup> *SOCAR (Heydar Aliyev, 121, Baku, AZ1029, Azerbaijan)*

### **For correspondence:**

Sadikhov Ilham / e-mail: ilham-sadixov@mail.ru

### **Abstract**

Raman spectroscopy provides useful information about hydrocarbon fluid inclusions in crude oils. In particular, the presence or absence of hydrocarbon functional groups may be qualitatively determined. In most oil spills situations, it is desirable to have more than one analytical technique for detecting of spilled oil to its suspected source. In this paper we present first results of Raman scattering spectra of crude oils taken from 6 Oil-gas Production Companies of Azerbaijan Republic.

**Key words:** Raman scattering, LIDAR, combinational light scattering, laser applications, oil pollution, laser spectroscopy, crude oil emission and scattering.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_51\_58

**Received** 10.05.2023

**Revised** 18.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

### **For citation:**

*Pashayev A.M., Valiyev N.A., Asgerov K.E., Musayev A.A., Mammadov I.Kh., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.*

[Distinctive Features of Raman Spectroscopy of Crude Oils of the Absheron Peninsula]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 51-58 (in English)*

## **Abşeron yarımadasına məxsus xam neft nümunələrinin Raman səpilməsi spektrlərinin fərqləndirici xüsusiyyətləri**

**A.M. Paşayev<sup>1</sup>, N.A. Vəliyev<sup>2</sup>, K.Ə. Əsgərov<sup>1</sup>, A.A. Musayev<sup>1</sup>,  
İ.X. Məmmədov<sup>1</sup>, K.R. Allahverdiyev<sup>1</sup>, İ.Z. Sadıxov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

<sup>2</sup> *SOCAR (Heydər Əliyev, 121, Bakı, AZ1029, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Sadıxov İlham / e-mail: ilham-sadixov@mail.ru

### **Xülasə**

Raman spektroskopiyası, xam neftin tərkibindəki karbohidrogen mayeləri barədə faydalı məlumatlar verir. Xüsusilə, karbohidrogen funksional qruplarının mövcud olması və ya olmaması bu metodla keyfiyyətli şəkildə müəyyən edilə bilər. Məlum olduğu kimi Neft dağılmaları ilə əlaqəli əksər hallarda, dağılmış neftin aşkarlanması və ehtimal olunan mənbənin müəyyənləşdirilməsi üçün birdən çox analitik metodun olması məqsədə uyğundur. Bu məqalədə biz Azərbaycan Respublikasının 6 neft qaz çıxarma idarəsinə məxsus xam neft nümunələrinin Raman səpilməsi spektrlərinin ölçülməsinin ilkin nəticələrini təqdim edirik.

**Açar sözlər:** Raman səpilməsi, LIDAR, İşığın Raman səpilməsi, lazerin praktiki tətbiqi, neft çirklənməsi, lazer spektroskopiyası, xam neftin şüalanması.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_51\_58

УДК 550.8.08

## **Отличительные характеристики рамановской спектроскопии сырой нефти Апшеронского полуострова**

**A.M. Paşayev<sup>1</sup>, N.A. Vəliyev<sup>2</sup>, K.E. Askerov<sup>1</sup>, A.A. Musaev<sup>1</sup>, İ.X. Məmmədov<sup>1</sup>,  
K.R. Allahverdiyev<sup>1</sup>, İ.Z. Sadıxov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

<sup>2</sup> *SOCAR (Heydər Əliyev, 121, Bakı, AZ1029, Azərbaycan)*

### **Для переписки:**

Sadıxов Ильхам / e-mail: ilham-sadixov@mail.ru

### **Аннотация**

Спектроскопия комбинационного рассеяния света дает полезную информацию о включениях углеводородных флюидов в сырой нефти. В частности, может быть качественно определено наличие или отсутствие углеводородных функциональных групп. В большинстве ситуаций, связанных с разливами нефти, желательно иметь более одного аналитического метода для обнаружения разлитой нефти и определения предполагаемого источника. В статье представлены первые результаты спектров комбинационного рассеяния сырой нефти, полученных от 6 нефтегазодобывающих компаний Азербайджанской Республики.

**Ключевые слова:** Рамановское рассеяние, ЛИДАР, комбинационное рассеяние света, использование лазеров на практике, нефтяное загрязнение, лазерная спектроскопия, эмиссия и рассеяние сырой нефти.

## Introduction

Crude oil is very wide and diverse class of substances [1-5]. The complex nature of crude oil, may lead in complex chemical analysis method. In our previously published paper, we described KA-14 LIDAR developed at National Aviation Academy of Azerbaijan to detect oil spills on water surface of Caspian Sea and earth of Absheron peninsula [5-11].

According to existing literature 4 different techniques (infrared spectroscopy, fluorescence (FL), gas chromatography and low temperature luminescence) were used to identify oil spills on water surface and to establish spills source. FL spectra and identification of oil spills on Caspian Sea as measured by KA-14 LIDAR, developed at the NAA, were published by the authors of present article and the results have been described in [8-11].

Laser Raman spectroscopy is used in many scientific-research centers of world as a standard analytical method. At the same time as a tool in petroleum research, its role has been hindered by the high FL background. This FL background has such high intensity, that it is completely obscures any band due to Raman scattering (it is well known that intensity of Raman scattered bands is about 10-5 times less than intensity of excited light [12-16]).

In this paper we present the first results of Raman scattering spectra of crude oils taken from 6 Oil-gas Production Companies (OGPC) of Azerbaijan Republic.

## Analysis of scientific and technical literature on the topic

The Raman method is widely use for the purpose of studying and confirming the composition of useful fossil migrations for obtaining oil spectra from different oil fields. The study showed that fats had similar

molecular-mass regions, which were specific to a baseline region.

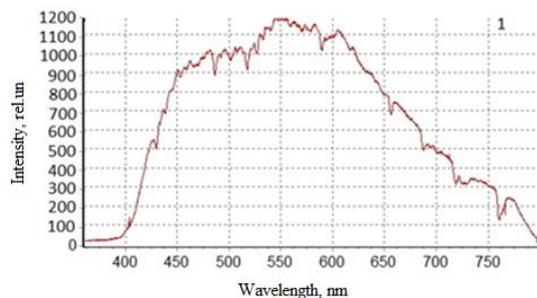
An analysis of the literature shows that Raman spectra of oils are observed in a wide range of the spectrum, including high-frequency. The most pronounced stripes of Raman bands are observed in the following wavelength:  $\sim 450\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1550\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1730\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1770\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1850\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1950\text{ cm}^{-1}$  [1-4, 12, 14-16].

Compared to other methods, Raman spectroscopy facilitates the process of direct measurement in solid, liquid and gaseous media. The pattern has a number of advantages, such as special training and the absence of neutral to absorption strips.

Raman spectroscopy is widely used also for obtaining oil spectra from oil fields. When measuring the wavelength of  $\lambda = 532\text{ nm}$  in most substances are presented spectra in which radiation absorption occurs as a result of observation of FL, which is distinguished by wider maximums compared to the Raman signal.

To avoid FL effect, it is necessary to take measurements at a wavelength of  $\lambda=1064\text{ nm}$  or longer using a portable spectrometer. Measurements with a wavelength of  $\lambda = 1064\text{ nm}$  look promising for the analysis of crude oils by the Raman spectroscopy. Our measurements of Azerbaijanian crude oils by using the KA-14 LIDAR showed that the observed high intensity FL strongly quenches weak Raman spectra. In addition, we tried to perform measurements of Raman oil spectra using devices in the Laser Spectroscopy laboratory of the National Aviation Academy. Such devices include: •laser "Quantel Brilliant B" (main beams at  $\lambda = 532\text{ nm}$ ,  $\lambda = 255\text{ nm}$  and  $\lambda=266\text{ nm}$ ); •pulse duration-5 ns; •power 310 mJ, 170 mJ, and 60 mJ respectively; •MDR - 41 spectrometer, •photo detectors FEU - 62 and FEU - 100.

Unfortunately, the FL generated in the crude oils was extinguishing the expected Raman scattering spectrum (Figure 1).



**Figure 1** – Room temperature FL spectrum of crude oil of *Absheron OGPC (Pirallahi, Artem)*. Measurements were carried out with help of the *KA-14 LIDAR* developed at NAA. The spectrum is excited by the *CRF - 355* laser line of wavelength  $\lambda = 255$  nm

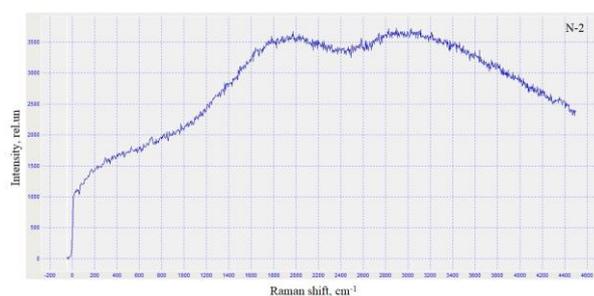
In accordance with the above described, it was decided to carry out measurements on a special (manufactured in Japan) Raman installation located at the Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences. This setup is performed using the excitation Spectra of YAG: Nd<sup>3+</sup> laser second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).

## Conclusion

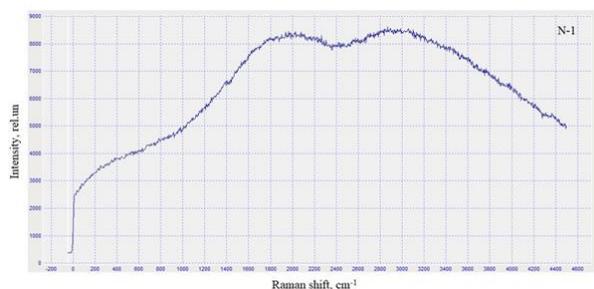
Analysis of the available literature, calibration and maintenance of KA-14 LIDAR was carried out. An analysis of the available literature has led to the conclusion that the Raman spectra of crude oil is a fairly reliable method for creating Raman spectra of crude oil debris on water and earth surfaces and a Data Bank based on these spectra. The results given by the measurements carried out on the basis of the caliber are consistent with the results published in modern literature. The scientific and technical requirements of the research work put forward have been experienced and clarified. Thus, it was decided to measure the Raman spectra of

crude oil samples from 12 OGPCs of Azerbaijan. On the basis of the project, separate spectral analysis of the extracted oils in different zones of Absheron peninsula and the creation of Raman spectra's Data Bank of oils based on the data obtained are underway. The mentioned zones included 8 (eight) OGPCs belong to AzNeft (Azerbaijan) and 4 (four) Joint Ventures under AzNeft: OGPC: 1. Absheron; 2. Narimanov; 3. Oil Rocks; 4. Amirov; 5. Siyazan; 6. Tagiyev; 7. May 28; 8. Bibiheybat; Joint Ventures: 1. Balakhani Oil; 2. Muradkhanli Oil; 3. Surakhani Oil; 4. Binagadi Oil.

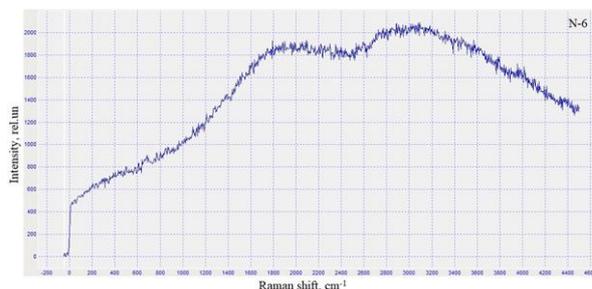
Measurement of Raman spectra by KA-14 LIDAR did not give any positive results. It was obviously to expect for this, since weak Raman scattering lines ( $10^{-5}$  degrees weaker from the intensity of the excitation laser) are screened with strong FL lines of oils ( $10^{-1}$  degree's from the intensity of the excitation laser). Therefore, we decided to carry out the measurement of Raman spectra of oils using the Raman device available at the Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences. Some of these first results is presented in Figures 2-7.



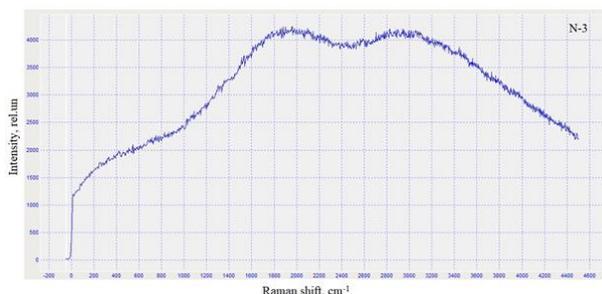
**Figure 2** – Raman spectrum of crude oil of OGPC named after Tagiyev. The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).



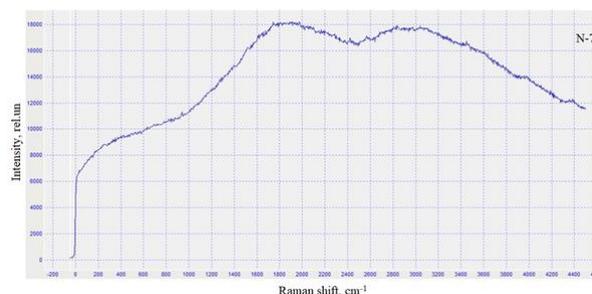
**Figure 3** – Raman spectrum of crude oil of Lokbatan-BUTA OGPC. The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).



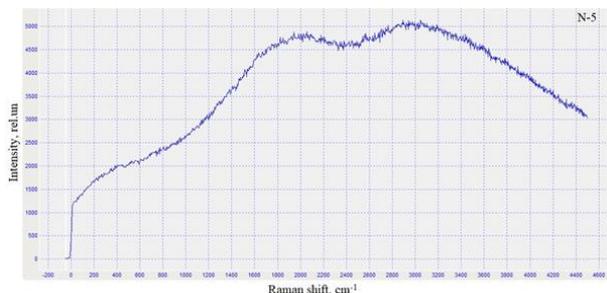
**Figure 6** – Raman spectrum of crude oil of Narimanov OGPC. The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).



**Figure 4** – Raman spectrum of crude oil of 28 May OGPC. The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).



**Figure 7** – Raman spectrum of crude oil of Oil Rocks OGPC (Neftjanie Kamni). The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).



**Figure 5** – Raman spectrum of crude oil of Bibiheybat OGPC. The measurements were carried out by Raman spectra measurement equipment at the Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences. Spectrum was excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonic ( $\lambda = 514.5$  nm).

As can be seen from Figures 2-7, the characteristic features of the Raman scattering spectra are observed as a weak wide bands in the spectral ranges of : •200 - 600 cm<sup>-1</sup>, •1500-2300 cm<sup>-1</sup> and •2400-3400 cm<sup>-1</sup>.

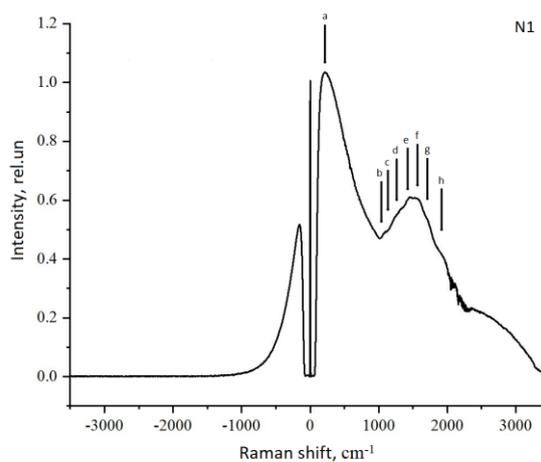
The Raman spectra of crude oils of the remaining six OGPCs excited using YAG: Nd<sup>3+</sup> laser's second harmonics ( $\lambda = 514.5$  nm) are basically similar to those shown in Figures 2-7. Finally, it is worth noting that we plan to perform Raman scattering spectra of Azerbaijani oils using near-infrared laser lines to exclude a high-intensity FL background.

We contacted some colleagues in the Institute of Spectroscopy Russian Academy of Sciences and agreed on measurement questions. The equipment available in this organization (has a radiation wavelength of 1064 nm (1.16 eV)) excites Raman scattering spectra and significantly reduces the FL intensity of crude oil spectra.

One of preliminary results of Raman spectrum of crude oil taken from Lokbatan-BUTA OGPC is presented in Figure 8.

Finally, it is worth noting that we plan to perform Raman scattering spectra of Azerbaijani oils using near-infrared laser lines to exclude a high-intensity FL background. We contacted some colleagues in the Institute of Spectroscopy Russian Academy of Sciences and agreed on measurement questions. The equipment available in this organization (has a radiation wavelength of 1064 nm (1.16 eV)) excites Raman scattering spectra and significantly reduces the FL intensity of crude oil spectra. One of preliminary results of Raman spectrum of crude oil taken from Lokbatan-BUTA OGPC is presented in Figure 8. Finally, it is worth noting that we plan to perform Raman scattering spectra of Azerbaijani oils using near-infrared laser lines to exclude a high-intensity FL background. We contacted some colleagues in the Institute of Spectroscopy Russian Academy of Sciences and agreed on

measurement questions. The equipment available in this organization (has a radiation wavelength of 1064 nm (1.16 eV)) excites Raman scattering spectra and significantly reduces the FL intensity of crude oil spectra. One of preliminary results of Raman spectrum of crude oil taken from Lokbatan-BUTA OGPC is presented in Fig. 8.



**Figure 8** – Raman spectrum of crude oil of Lokbatan-BUTA OGPC. The measurements were carried out with the Raman installation, which is available at the Institute of Spectroscopy of Russian Academy of Sciences. The spectrum was excited by the YAG:Nd<sup>3+</sup> laser ( $\lambda = 1064$  nm). Horizontal axis- Raman shift, cm<sup>-1</sup>. Vertical axis- intensity, rel. units

Frequency values of Raman scattering of crude oils obtained from the final processing of spectrum (Figure 8) is shown in Table 1.

**Table 1** – Frequency values of Raman scattering of crude oils obtained from the final processing of spectrum (Figure 8)

Sample	Peak No1 (a) cm <sup>-1</sup>	Peak No2 (b) cm <sup>-1</sup>	Peak No3 (c) cm <sup>-1</sup>	Peak No4 (d) cm <sup>-1</sup>	Peak No5 (e) cm <sup>-1</sup>	Peak No6 (f) cm <sup>-1</sup>	Peak No7 (g) cm <sup>-1</sup>	Peak No8 (h) cm <sup>-1</sup>
Lokbatan - Buta OGPC	205	1090	1150	1200	1490	1570	1750	1950

Planned measurements in the Raman scattering spectra of crude oil from the remaining eleven organizations will allow the creation of a Data Bank of crude oils from Absheron peninsula of Azerbaijan.

### Acknowledgments

The authors are indebted to the State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR)

for financial support of present research in a frame of project “Creation of Raman Spectra Bank of Oil Extracted in Different Zones of Absheron Peninsula via LIDAR”.

### Conflict of Interests

The authors declare there is no conflict of interests related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. **Petrov A.A.** Petroleum Hydrocarbons. Berlin: *Springer Verlag*, 1984. 174 p. (in English)
2. **Orange D., Knittle E., Farber D., and Williams Q.** Raman spectroscopy of crude oils and hydrocarbon fluid inclusions: a feasibility study // *Mineral Spectroscopy: A tribute to Roger G. Burns. The Geochemical Society*. 1996. Special Publication No 5. Editors: Dyar M.D., McCammon C. and Schaefer M.W., pp. 65-81 (in English)
3. **Zbignev Otremba.** Coefficient of light reflection foreseen for chosen oil. // *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2014, Vol. 21, No 4, pp. 375-379 (in English)
4. **Shamirzaev V.T., Gaiser v.A., Shamirzaev T.S.** 2015. “Fluorescence of crude oils”. // *Bull. RAS. Physics*. Vol. 79, No 2, pp. 115-119 (in English)
5. **Pashayev A.M., Taghiyev B.G., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** Sensing of contaminations on water and earth surfaces by LIDAR developed at NAA”. // *Book of Abstracts, International Conference Devoted to 10th Anniversary of Institute of Physics Problem of Baku State University, Baku, 2015, Decembed 16-25.* pp. 22-24. (in Russian)
6. **Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., Musayev A., Sadikhov I.** LIDAR for remote sensing of contaminations on water surfaces taking place during oil-gas production. // *Proc. of SPIE*, 2015. Vol. 9810, pp. 981018-1 – 981018-7. (in Russian)
7. **Pashayev A.M., Allahevdiyev K.R., Tagiyev B.G., Sadikhov I.Z.** Light induced fluorescence LIDAR developed and employed at the National Aviation Academy of Azerbaijan // *Proc. of SPIE*, 2016. Vol. 10226, pp. 102260W-1 – 102260W-6 (in Russian)
8. **Pashayev A., Tunaboylu B., Usta M., Sadixov I., Allahverdiyev K.,** 2017. Perspectives of methods of laser monitoring of atmosphere and sea surface // *Proc. of SPIE*, Vol. 10226, pp. 102260V-1 – 102260V-9. (in Russian)
9. **Pashayev A.M., Tagiyev B.G., Veliyev N.A., Bagirov Y.M., Musayev A.A., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** Fluorescence spectra of oil spills on Caspian sea as measured by KA-14 LIDAR developed at the National Aviation Academy of Azerbaijan // *Azerbaijan Oil Industry*, 2018, №7,8, pp. 67-71 (in Russian)
10. **Pashaev A.M, Veliev N.A., Mamedov I.H., Musaev A.A., Bagirov Ya.M., Allahverdiyev K.R., Sadyhov I.Z.** Otlichitelnye harakteristiki spektrov emissii syroj nefi Apsheronского poluostrova, zaregistrirrovannye s pomoshchyu LIDARa KA-14 // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2021. T. 64, No 11, s. 115-119. (in Russian)

11. **Sadikhov I.Z.** Calibration of KA-14 LIDAR to measure the fluorescence spectra of oils extracted in various zones. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 15-19. (in Russian)
12. **Ahmadjian Mark, Brown W. Chris.** Petroleum identification by laser Raman spectroscopy // *Analytical Chemistry*, 1976. Vol. 48, No 8, pp. 1257-1259. (in Russian)
13. **Singh R.** Raman and the discovery of the Raman effect // *Physics in Perspective*, 2002. Vol. 4, No 4, pp. 399-420. (in English)
14. **Pironon J., Sawatzki J., Dubessy J.** Raman microscopy of fluid inclusions. Comparison with Raman and FT-IR micro spectroscopies // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1991. Vol. 55, pp. 3885-3891. (in English)
15. **Orange D., Knitile E., Farber D. and Williams Q.** Raman spectroscopy of crude oils and hydrocarbon fluid inclusions: A feasibility study // *Mineral Spectroscopy: A Tribute to Roger G. Burns.* The Geochemical Society. Special publication. 1996. No 5, pp. 65-81. (in English)
16. **Podgorski D., Zito P., A. Kellerman, B. Bekins, I. Cozzarelli, Donald F. Smith, X. Cao, K. Schmidt-Rohr, S. Wagner, A. Stubbins, R. Spencer.** Hydrocarbons to carboxyl-rich alicyclic molecules: A continuum model to describe biodegradation of petroleum-derived dissolved organic matter in contaminated groundwater plumes // *Chemistry, Environmental Science.* 2021, Vol. 40, pp. 320-327. (in English)

## **Calculation of Structural Reliability of Main Gas Pipelines Using Modern Software Application**

**A.R. Nagizade<sup>1</sup>, F.B. Ismayilova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Oil and Gas Projects Institute, SOCAR (H. Zardabi küç, 88A, Baku, AZ1122, Azerbaijan)*

<sup>2</sup> *Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

### **For correspondence:**

Ismayilova Fidan / e-mail: fidan.ismayilova.2014@mail.ru

### **Abstract**

In the article, the issue of pipeline thickness calculation with methods based on modern technologies is considered. According to the coefficient of working conditions of the pipeline, the calculated resistance to tension (compression) is determined and the thickness of the pipe is calculated based on the obtained result. Also, as a result of the calculation of the pipe elements, the stress-deformation state is analyzed along the surface of the pipeline where the technical inspection is carried out. During the calculations, both the analytical method and modern software are used. A three-dimensional spatial model of the pipeline is built through the software, and a report on the strength and stability of the pipeline under the influence of a number of forces is conducted. Also, as a result of the technical diagnostics of the pipeline, the possibility of future operation of the pipe element is determined.

**Keywords:** main gas pipeline, strength, stability, stress-strain, calculated resistance, temporary resistance, yield strength, reliability coefficient, allowable stress.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_59\_65

**Received** 06.02.2023

**Revised** 19.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

### **For citation:**

*Nagizade A.R., Ismayilova F.B.*

[Calculation of Structural Reliability of Main Gas Pipelines Using Modern Software Application]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 59-65 (in Azerbaijani)*

## Magistral qaz kəmərlərinin konstruktiv etibarlılığının müasir proqram təminatı vasitəsilə hesablanması

A.R. Nağızadə<sup>1</sup>, F.B. İsmayılova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>“Neftqazemlətdəqiqatlayihə” İnstitutu, SOCAR (Həsən bəy Zərdabi, 88A, Bakı, AZ1122, Azərbaycan)

<sup>2</sup> Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

**Yazışma üçün:** İsmayılova Fidan / e-mail: fidan.ismayilova.2014@mail.ru

### Xülasə

Məqalədə müasir texnologiyalara əsaslanan üsullar ilə boru kəmərinin qalınlığının hesablanması məsələsinə baxılmışdır. Boru kəmərinin iş şəraiti əmsalına uyğun olaraq dartılmaya (sıxılmaya) hesabi müqaviməti təyin olunmuş və alınan nəticə əsasında borunun qalınlığı hesablanmışdır. Eləcə də, boru elementlərinin hesablanması nəticəsində kəmərin texniki müayinə aparılmış səthi boyunca gərginlik-deformasiya vəziyyəti təhlil olunmuşdur. Hesablamalar zamanı həm analitik üsuldən, həm də müasir proqram təminatından istifadə olunmuşdur. Proqram təminatı vasitəsilə boru kəmərinin üçölçülü fəza modeli qurulmuş və bir sıra qüvvələrin təsirindən kəmərin möhkəmliyə və dayanıqlığa hesabatı aparılmışdır. Həmçinin, boru kəmərinin texniki diaqnostikası nəticəsində boru elementinin gələcəkdə istismarının mümkünlüyü müəyyən olunmuşdur.

**Açar sözlər:** magistrallıq qaz kəməri, möhkəmlik, dayanıqlıq, gərginlik-deformasiya, hesabi müqavimət, müvəqqəti müqavimət, axma həddi, etibarlıq əmsalı, buraxılabilən gərginlik.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_59\_65

УДК 621.681

## Расчет конструктивной надежности магистральных газопроводов с использованием современного программного обеспечения

A.P. Nağızadə<sup>1</sup>, F.B. İsmayılova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Проектный институт нефти и газа, SOCAR (ул. Гасан бека Зардаби, 88А, Баку, AZ1122, Азербайджан)

<sup>2</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

**Для переписки:** Исмайллова Фидан / e-mail: fidan.ismayilova.2014@mail.ru

### Аннотация

В статье рассмотрен вопрос расчета толщины трубопровода методами, основанными на современных технологиях. Сопротивление трубопровода растяжению (сжатию) определяли по коэффициенту условий работы и по результату рассчитывали толщину трубы. В результате расчета также было определено напряженно-деформационное состояние вдоль поверхности трубопровода. При расчетах использовались как аналитические методы, так и современное программное обеспечение. С помощью программного обеспечения построена трехмерная пространственная модель трубопровода и проведен отчет о прочности и устойчивости трубопровода под действием ряда сил. Также в результате технической диагностики трубопровода определена возможность дальнейшей эксплуатации элемента трубы.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, прочность, устойчивость, напряженно-деформированное состояние, расчетное сопротивление, временное сопротивление, предел текучести, коэффициент надежности, допускаемое напряжение.

## Giriş

İstismarda olan boru kəmərlərinin gələcəkdə istismarının mümkünlüyü – neft-qaz sənayesinin ən vacib məsələlərindən biridir. Məhz bu səbəbdən, boru kəmərlərinin texniki vəziyyətinin vaxtaşırı müayinə (diaqnostika) edilməsi zəruridir. İstismar dövründə baş verə biləcək qalınlıq itkilərini nəzərə alaraq, boru kəmərlərində aparılan texniki diaqnostika işləri bir sıra mərhələdə aparılır [1]: Hazırlıq işləri; Texniki inspeksiya; Diaqnostika; Kəmərin mövcud texniki vəziyyəti və gələcək istismar mümkünlüyü haqqında yekun aktın tərtibi.

Bildiyimiz kimi, neft-qaz mədən qurğuları istismar edilən vaxtdan etibarən bir sıra xarici və daxili amillərin təsirlərinə məruz qalır. İstismar müddəti dövründə bu təsirlər kəmərin müxtəlif elementlərində, əsasən də boru divarının qalınlığında itkilərin yaranmasına gətirib çıxarır [2]. Kəmərin müxtəlif təşkilətilərini (xətti hissə, dirsək, keçid və s.) əlaqələndiyi qaynaq elementlərində yaranan qüsurlar kəmərin istismar müddətinin azalmasına, hətta dayanmasına da səbəb ola bilər. Bütün bu kimi təsirləri nəzarətdə saxlamaq üçün vaxtaşırı boru kəmərlərinin diaqnostik müayinəsinin aparılması vacibdir [3]. Əgər boru kəmərləri mövcud standartların tələblərinə uyğun olaraq mütəmadi yoxlanılmazsa, hər hansı yükün təsirindən kəmərin qəzalılıq vəziyyətə düşməsi və mürəkkəbləşmələrin baş verməsi qaçılmazdır. Hal-hazırda göstərilən problemin həlli üçün praktikada bir sıra metodlar tətbiq edilməkdədir. Konstruktiv etibarlılığın artırılması kəmərdə aparılan texniki müayinə işləri nəticəsində əldə olunur. Aparılan diaqnostika işləri bir sıra statik və dinamik yüklərin təsirindən kəmərdə baş verə biləcək potensial təhlükələrin aşkar olunmasında mühüm rol oynayır. Diaqnostik işlərin görülməsində məqsəd – neft-qaz kəmərlərinin gələcək istismar müm-

künlüyünün müəyyən olunmasıdır. Məhz bu səbəbdən, kəmərin istismarı zamanı boru kəmərlərinin konstruktiv etibarlılığının hesablanması məsələsi böyük aktuallıq kəsb edir.

## İşin məqsədi

Tədqiqatın məqsədi – görülmə diaqnostik işlər nəticəsində boru kəmərinin müxtəlif elementlərinin qalıq istismar resurlarının təyini-dir. Tədqiqatlarda “STAAD.Pro” proqram təminatı vasitəsilə proses modelləşdirilmiş, riyazi hesablamalar nəticəsində qaz kəmərinin divarının qalınlığı təyin olunmuşdur.

Tədqiqat olunan magistral boru kəmərinin istismar vəziyyətinin təhlili aşağıdakı ardıcılıqla aparılmışdır.

**1. Boru kəmərinin dartılmaya (sıxılmaya) hesabi müqavimətinin təyini.** İstismarda olan magistral boru kəmərlərində konstruktiv etibarlılığın müəyyən olunması üçün möhkəmliyə və dayanıqlılığa hesabat aparılmalıdır. Bunun üçün öncə kəmərin dartılmaya  $R_1^n$  və sıxılmaya  $R_2^n$  görə (müvəqqəti müqavimət və axma həddi) normativ müqavimətlərinin minimal qiyməti müəyyən olunur. Bu hesabi müqavimətlər göstərilən qaydada hesablanır [4]:

$$R_1 = \frac{R_1^n \cdot m}{k_1 \cdot k_e}; \quad R_2 = \frac{R_2^n \cdot m}{k_2 \cdot k_e} \quad (1)$$

$$R = \min \{R_1; R_2\}$$

Burada:  $R_1^n$  - dağılmada normativ müqavimət, MPa;  $k_1$  qq/sm<sup>2</sup>;  $R_2^n$  - axma həddi, MPa;  $k_2$  qq/sm<sup>2</sup>;  $m$  - boru xəttinin iş şəraiti əmsalı;  $k_1$  və  $k_2$  - materiala görə etibarlılıq əmsalı;  $k_e$  - boru xəttinin təyinatına görə etibarlılıq əmsalıdır.

Boru kəmərinin yerləşdiyi ərazinin uyğun gəldiyi kateqoriyaya əsasən təyin olunmuş iş şəraiti əmsalının qiymətləri cədvəl 1-də verilmişdir [5]. Materiala görə və boru xəttinin təyinatına görə etibarlılıq əmsalları, müvafiq olaraq, cədvəl 2-4-ə əsasən seçilir [6-8]:

**Cədvəl 1** – Boru kəmərinin möhkəmliyə, dayanıqlığa və deformasiyaya hesablanarkən iş şəraiti əmsalı.

**Table 1** – Working condition coefficient while calculating the strength, stability and deformation of the pipeline.

Boru kəməri və onun sahəsinin kateqoriyası	Boru kəmərinin möhkəmliyə, dayanıqlığa və deformasiyaya hesablanarkən iş şəraiti əmsalı, m
Daha əhəmiyyətli sahələrdə binalar daxili kompressor stansiyalar daxili, yeraltı qaz anbarlarında diametri Ø1200 mm-lik neft borularının su keçidində B	0.60
Magistral boru xətlərinin su keçidləri, dəmiryol keçidləri, avtomobil yolları, çətin keçilən bataqlıqlar, kompressor stansiyaları ilə kəsişmələr, şar buraxma və qəbuletmə məntəqələrində I və II	0.75
III	0.90
IV	0.90

**Cədvəl 2** – Materiala görə etibarlıq əmsalı,  $k_1$

**Table 2** – Reliability factor by material,  $k_1$

Borunun xarakteristikaları	Materiala görə etibarlıq əmsalı, $k_1$
Bütöv texnoloji tikiş xətersiz üsulla 100% nəzarətdən keçmiş yayma poladdan və termiki möhkəmləndirilmiş qaynaqlı borular	1,34
Bütöv texnoloji tikiş üzrə 2 tərəfli elektrik qövs qaynağı ilə hazırlanmış, yayılmış və döyülüb hazırlanmış tikişsiz borular	1,40
İkitərəfli elektrik qövs qaynağı ilə hazırlanmış xətersiz və ya dağıdıcı olmayan 100% nəzarətdən keçirilmiş azlegirlənmiş və ya karbonlu poladdan hazırlanmış qaynaqlı borular	1,47
İkitərəfli qövs qaynağı ilə aparılmış az legirlənmiş və ya karbonlu poladdan hazırlanmış qaynaqlı borular və digər tikişsiz borular	1,55

**Cədvəl 3** – Materiala görə etibarlılıq əmsalı,  $k_2$

**Table 3** – Reliability factor by material,  $k_2$

Borunun xarakteristikaları	Materiala görə etibarlılıq əmsalı, $k_2$
Az karbonlu ,tikişsiz	1,10
$R_2^n/R_1^n \leq 0,8$ üzrə azkarbonlu və az legirlənmiş düz tikişli və spiralvari tikişli, qaynaqlı	1,15
$R_2^n/R_1^n > 0,8$ üzrə yüksək möhkəmlikli poladdan hazırlanmış	1,20

**Cədvəl 4** – Boru xəttinin təyinatına görə etibarlılıq əmsalı,  $k_r$

**Table 4** – Reliability coefficient according to the designation of the pipeline,  $k_r$

Borunun şərti diametri, mm	Boru xəttinin təyinatına görə etibarlılıq əmsalı, $k_r$			
	Qaz boru xətti üçün			Neft və neft məhsulları üçün
	$P \leq 5,4$ MPa	$5,4 < P \leq 7,4$ MPa	$7,4 < P \leq 9,8$ MPa	
500-ə qədər	1,00	1,00	1,00	1,00
600-1000	1,00	1,00	1,05	1,00
1200	1,05	1,05	1,10	1,05
1400	1,05	1,10	1,15	-

**2. Boru kəmərinin divarının qalınlığının təyini.** Boru xəttinin verilmiş  $P$  işçi (normativ) təzyiq altında lazımı möhkəmliyini təmin edən hesabi qalınlığı  $\delta$  (mm) aşağıdakı düsturla hesablanır [9]:

$$\delta = \frac{n \cdot P \cdot D}{2(R+n \cdot P)} \quad (2)$$

Burada:  $P$  – işçi təzyiq, MPa;  $n$  – yükə görə etibarlılıq əmsalı;  $D$  – borunun xarici diametri, mm;  $R$  – polad üçün qırılmada buraxılabilən gərginlik həddidir.

**3. Yeraltı magistral qaz kəmərinin texniki müayinə işlərinin aparılması.** Texniki diaqnostika işlərinin aparılmasında əsas məqsəd – boru kəmərinin potensial təhlükəli hissələrini aşkar etmək, qüsurların təhlükə dərəcələrini qiymətləndirmək, təhlükəli hissələrin prioritetini müəyyən edib qabaqlayıcı təmir işləri aparmaqdan ibarətdir [10]. Mövcud texniki tapşırığa əsasən, “Astara-Qazıməmməd” yeraltı magistral qaz kəmərinin 187-ci km sahəsində layihə təzyiqi  $P_{\text{lay}}=5,5$  MPa, maksimum icazə verilən işçi təzyiq isə  $P_{\text{işçi}}=1,8$  MPa qəbul edilmişdir. Borunun xarici diametri  $D=1220$  mm, poladın markası isə 17Г1С-Y-dur. Texniki diaqnostika zamanı qaz kəmərinin “Olympus 27-MG” markalı ultrasəs prinsipli qalınlıqölçən cihaz vasitəsilə instrumental ölçmə işləri yerinə yetirilmişdir. Tədqiqatlarda əldə olunmuş faktiki məlumatlar əsasında boru xəttində mövcud daxili təzyiqə müvafiq minimal buraxılabilən qalınlıqlar hesablanmış və faktiki minimal qalınlıqlarla müqayisə olunmuşdur. Beləliklə, instrumental ölçmələr, minimal qalınlıqlar və istismar yükləri əsasında qaz kəmərinin təhlükəsiz istismarının mümkünlüyü fakti öyrənilmişdir.

### Məsələnin həlli

Tədqiq olunmuş boru xəttinin təhlükəsiz istismar ehtiyatlarının qiymətləndirilməsi, on-

larda müşahidə olunmuş səthi qüsurlar və çatışmazlıqlar nəzərə alınmaqla birbaşa ölçmələr nəticəsində müəyyən edilmişdir. Faktiki minimal en kəşik qalınlıqları isə daxili təzyiq altında möhkəmiyyət hesabının nəticələrinə əsasən aparılmışdır.

“Astara-Qazıməmməd” yeraltı magistral qaz kəmərinin  $L=187,74$ -cü km-də açılmış şurfdə  $P=1,8$  MPa təzyiq altında aparılan ölçü işləri nəticəsində kəmərin müxtəlif yerlərində divarının qalınlığı müəyyən olunmuşdur:

- üstüdə – 12,18; 12,24; 12,36; 12,45; 12,40; 12,58; 12,65 mm ( $\delta_{\text{orta}} = 12,18$  mm).
- yanda – 11,96; 11,95; 11,80; 11,91; 11,96; 11,93; 11,98 mm ( $\delta_{\text{orta}} = 11,80$  mm).
- altda – 9,85; 9,64; 9,49; 9,19; 9,25; 9,30; 9,38; 9,48 mm ( $\delta_{\text{orta}} = 9,19$  mm).

Həmçinin, borunun yan və alt səthində dərinliyi 5÷6 mm olan korroziya yaraları və laylı korroziya məhsulları aşkar olunmuşdur.

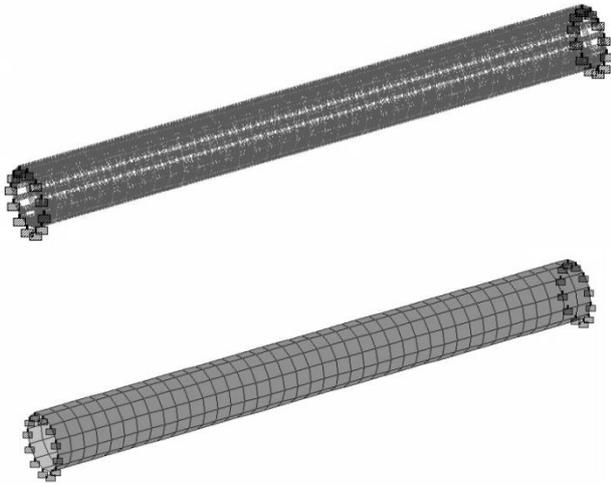
Kəmərin en kəsiyinin verilmiş şərtlər daxilində tələb olunan minimal qalınlığının hesabi qiyməti belə təyin edilmişdir:

$$\delta = \frac{n \cdot P \cdot D}{2(R+n \cdot P)} = \frac{1,1 \cdot 1,8 \cdot 1220}{2(260,87+1,1 \cdot 1,8)} = 4,6 \text{ mm}$$

Kəmərin alt səthində aparılan ölçü işlərində alınan nəticənin (korroziya yaraları nəzərə alınmaqla) hesabi qiymətlə müqayisəsi nəticəsində bu hissənin artıq istismara yararsız olduğu müəyyən edilmişdir.

**Konstruktiv modelin yaradılması.** Kəmərin möhkəmlik və dayanıqlılıq analizi standart **STAAD.Pro Connect Edition** proqram təminatı vasitəsilə yerinə yetirilmişdir [10-11].

Modelləşdirilmiş 1220 mm-lik magistral qaz kəmərinin sadə sxemi şəkil 1-də verilmişdir. “Astara-Qazıməmməd” yeraltı magistral qaz kəmərinin 187,74-cü km-də istifadə olunan metalın xüsusiyyətləri cədvəl 5-də göstərilmişdir.



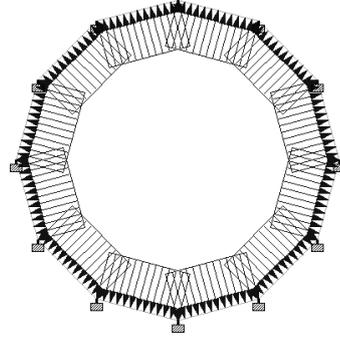
**Şəkil 1** – Qaz kəmərinin sadələşdirilmiş modeli  
**Figure 1** – A simplified model of a gas pipeline

**Cədvəl 5** – Metalın xüsusiyyətləri  
**Table 5** – Properties of metal

Göstəricilər	Faktiki ölçüləri
Sıxlıq, ton/ m <sup>3</sup>	7,849
Elastiklik modulu, E , kN/ sm <sup>2</sup>	20000
Sürüşmə modulu, G , kN/ sm <sup>2</sup>	7722
Puasson əmsalı	0,3
Axıcılıq həddi, Fy , kN/ sm <sup>2</sup>	24,5

### Tətbiq olunan yüklərin paylanması

Tətbiq olunan riyazi modeldə, metal kütlə daxil olmaqla, kəmərdə yaranan işçi təzyiq nəzərə alınmışdır. Yüklərin paylanması sxemi şəkil 2-də göstərilmişdir.

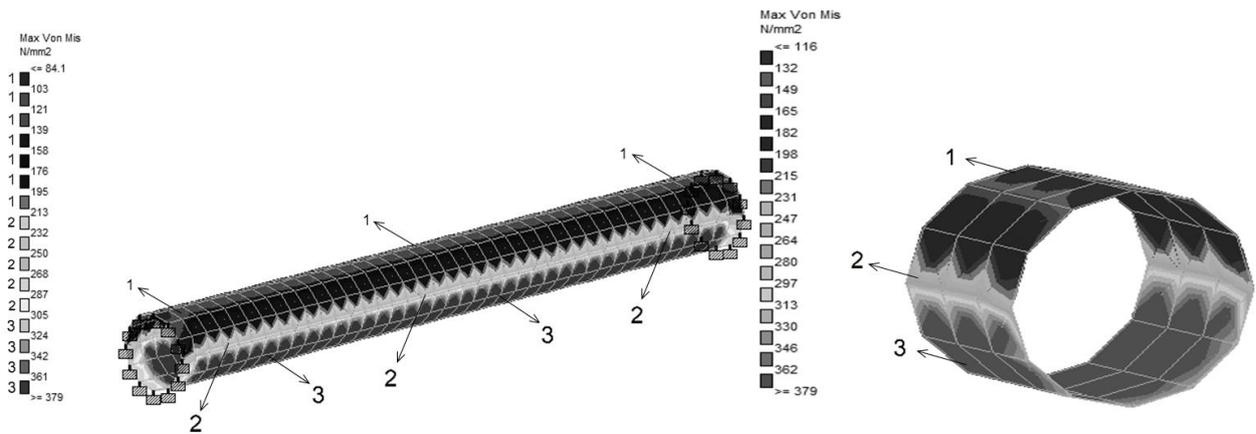


**Şəkil 2** – Tətbiq olunan yüklərin kəmərin səthi boyu paylanması

**Figure 2** – Distribution of applied loads along the surface of the pipeline

### Gərginlik-konsentrasiya zonasının müəyyən edilməsi

Tətbiq olunmuş yük kombinasiyasının təsirindən boruda yaranan axma həddinin maksimal qiymətinin 379 MPa olduğu müəyyən edilmişdir.



**Şəkil 3** – Boru kəməri elementlərində yaranan gərginlik həddinin qiymətləndirilməsi  
**Figure 3** – Estimation of stress limit in pipeline elements

Kəmər in konstruktiv modeli STAAD.Pro program təminatında modelləşdirilmiş, metal çəkisi və kəmərdə yaranan işçi təzyiq nəzərə alınaraq, təhlil olunmuşdur. Göstərilmiş diaqramda qeyd olunan rəqəmlər kəmərdə yaranan gərginliyin artması istiqamətində sıralanmışdır. Kəmər in aşağı hissəsində alınan gərginliyin axma həddinin (379 MPa) metalın fiziki xüsusiyyətlərinə uyğun gələn axma həddindən (350 MPa) böyük olması səbəbindən, kəmərdə yaranan gərginliyin buraxılabilən gərginlik həddindən böyük olduğu müəyyən edilmişdir (şəkil 3).

### Nəticə

“Qaz İxrac” İdarəsinə məxsus “Astara-Qazıməmməd” yeraltı magistral qaz kəmər inin 187,74-cü km-də açılan şurfdə boru kəmər inin xətti hissəsində “Olympus 27MG” markalı ultrasəs prinsipli qalınlıqölçən cihazı ilə defektoskopiyə işləri aparılmışdır. Monitoring prosesində kəmər in səthində həlqəvi istiqamətdə ölçülər aparılaraq, faktiki divar qalınlıqlarının borunun üst səthində 12,18 mm, yan səthində

11,80 mm, alt səthində isə 9.19 mm olduğu müəyyən edilmişdir. Kəmər in alt səthində 5÷6 mm korroziya yaraları aşkar olunduğundan, bu hissədə qalınlığın faktiki qiymətinin 3,19 mm olduğu aşkarlanmışdır. Boru kəmər inin riyazi hesablamasından alınan hesabi qalınlığı faktiki qalınlığı ilə müqayisə olunaraq ( $3,19 < 4,60$ ), kəmər in istismara yararsız olduğu qənaətinə gəlinmişdir. Kəmər in konstruktiv modeli STAAD.Pro program təminatında modelləşdirilmiş, metal çəkisi və kəmərdə yaranan işçi təzyiq nəzərə alınaraq təhlil olunmuşdur. Alınan gərginliyin axma həddinin (379 MPa) metalın fiziki xüsusiyyətlərinə uyğun gələn axma həddindən (350 MPa) böyük olması səbəbindən, kəmərdə yaranan gərginliyin buraxılabilən gərginlik həddindən böyük olduğu müəyyən edilmişdir.

### Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

### REFERENCES

1. Mirzəyev O.H. Neft-qaz mədən avadanlıqlarının texniki diaqnostikasının əsasları. Bakı, 2012, 155 s. (in Azerbaijani)
2. Azərbaycan Respublikasının Dövlət Tikinti Normaları – Magistral boru kəmərlərinin Layihələndirmə normaları (AzDTN 2.9-2). Bakı, 2009. (in Azerbaijani)
3. Qaleyev V.B., Karpaçev M.Z., Xarlamenkov V.I. Magistralniye nefte-produktoprovodı. Moskva, 1976, 339 c. (in Russian)
4. İsmayılova F.B., İskəndərov E.X., Təzyiqin multifazalı neft kəmər inin buraxma qabiliyyətinə təsiri haqqında. “Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının XƏBƏRLƏRİ” Beynəlxalq elmi-texniki jurnal, cild 13, №1, Bakı 2021.s.54-57. (in Azerbaijani)
5. Texniçeskie usloviviya TY 14-3-1573-96. AO «UralNİTİ», 1997, 12 s. (in Russian)
6. Şammazov A.M., Tuqunov P.İ., Novoselov V.F., Korşaq A.A. Tipovye rasçetı pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov. Moskva, 2002, s.103-110. (in Russian)
7. QOST 8731-74 Trubı stalnie besşovnie qoryaçedeformirovannıe. Moskva, 01.01.1976, 45 s. (in Russian)
8. SNiP 2.05.06-85 Magistralnie truboprovodı, Moskva, 2011, 46 s. (in Russian)
9. Flare Details for Petroleum petrochemical and Natural Gas Industries. API. American Petroleum İnstitute. 2020. (in English)
10. ASME Code for Pressure Piping, B31. Process Piping. The American Society of Mechanical Engineers. 2016. Pp 129-130. (in English)
11. Stress Concentration Factors of Longitudinal and Transverse Plain Dents on Steel Pipelines. OMAE 2008-57836. Pp 3-6. (in English)

## **Application of Three-Dimensional Models on Spherical-Radial Filtration the Skin Zone**

**X.I. Dadash-zada, E.V. Gadashova**

*Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Qadashova Elmira / e-mail: elmira\_qadashova@hotmail.com

**Abstract**

Various models are used to determine the main filtering parameters. With the help of these models, the flow rate, pressure distributions, reservoir and well permeability are determined. Note that the complexity of the considered oil production processes makes it possible to mathematically describe the filtration process. However, when predicting technological indicators for designing the development of oil fields, rather simple models built on a single basis turn out to be the most acceptable. These models make it possible to carry out the most correct comparative analysis of various methods for increasing gas recovery, to implement multivariate systems to select the optimal development option, and to systematize the initial information.

**Keywords:** formation, skin factor, skin zone, contour and bottomhole pressure.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_66\_70

**Received** 10.05.2022

**Revised** 15.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Dadash-zada X.I., Gadashova E.V.*

[Application of Three-Dimensional Models on Spherical-Radial Filtration the Skin Zone]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 66-70 (in Russian)*

## **Sferik radial süzülmə zamanı üç ölçülü modelin tətbiqinin skin-faktora görə təyini**

**X.İ. Dadaş-zadə, E.V. Qadaşova**

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Qadaşova Elmira / e-mail: elmira\_qadashova@hotmail.com

### **Xülasə**

Süzülmənin əsas parametrini təyin etmək üçün müxtəlif modellərdən istifadə olunur. Bu modellərin köməyi ilə hasilat, təzyiğin paylanması, layın və quyunun keçiriciliyi təyin olunur. Bu mürəkkəb modellərin tətbiqi neft çıxarmada süzülmə prosesinin riyazi modelini verir. Ancaq qeyd etmək lazımdır ki, neft yataqlarının işlənmə proyektini verərkən, texnoloji göstəricilər əsasında əsas modelə görə bir qədər sadələşdirilmiş süzülmə modellərini vermək olar. Bu modellər müxtəlif istismar metodlarını bir-biri ilə müqayisə etmək imkanı yaradır. Buna görə sistemli verilmiş informasiyaya əsasən yatağın optimal variantı hesablanır.

**Açar sözlər:** lay, skin-faktor, skin-zona, kontur və quyudibi təzyiq.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_66\_70

УДК 622.246

## **Применение моделей трехмерной, сферически-радиальной фильтрации с учетом скин-зоны**

**Х.И. Дадашзаде, Э.В. Гадашова**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности  
(пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Гадашова Эльмира / e-mail: elmira\_qadashova@hotmail.com

### **Аннотация**

Для определения основных параметров фильтрации применяются различные модели. С помощью данных моделей определяются дебит, распределение давления, проницаемость пласта и скважины. Отметим, что сложность рассматриваемых процессов нефтедобычи обуславливает возможность математического описания процесса фильтрации. Однако при прогнозировании технологических показателей для проектирования разработки нефтяных месторождений наиболее приемлемыми оказываются достаточно простые модели, построенные на единой основе. Эти модели позволяют наиболее корректно проводить сравнительный анализ различных методов увеличения нефтеотдачи, осуществлять многовариантный выбор оптимальной схемы разработки, систематизировать исходную информацию.

**Ключевые слова:** пласт, скин-фактор, скин-зона, контурное и забойное давление.

## **Введение**

Практика показывает, что для определения технологических показателей разработки нефтяных месторождений необходимы специфические исходные данные о пласте, призабойной зоне скважины и т.д.

**Цель работы** – на основе сферической радиальной модели предложить математическую модель для определения основных показателей нефтяного месторождения с учетом скин-зоны в призабойной зоне нефтяной скважины.

## **Постановка задачи**

Выделение минимально необходимого числа факторов, определяющих наиболее существенные черты моделируемых процессов, приводит к постановке новых задач фильтрации. В настоящее время предложены разные математические модели и соответствующие им методики расчета технологических показателей, отражающие современное представление о фильтрации нефти в пористой среде.

Усовершенствование процесса фильтрации углеводорода при использовании сферическо-радиальной модели дает возможность более детально определить процессы, которые возникают в призабойной зоне с учетом скин-фактора [1-7].

## **Решение задачи**

Существующая модель, дополненная соответствующими начальными и граничными условиями, может реализоваться в численную модель трехмерного по толщине или по простиранию пласта.

При трехмерном моделировании одновременно учитываются эффекты, связанные с толщиной, мощностью, неоднородностью пласта в самом пласте и призабойной зоне (гравитационная сепарация, капиллярная пропитка, гидродинамический массообмен между связанными слоями разной проницаемости в пласте и скин-зоне) и по пласту.

Впервые применение трехмерной модели применил И.А. Чарный [3]. Автор указывает, что при определении дебита скважины, несовершенной по степени вскрытия, если величина вскрытия пласта мала, область фильтрации условий разбивается на две зоны.

Первая зона находится между контуром питания и радиусом, равным или большим толщины пласта. В данной зоне движение можно считать плоскорадиальным.

Вторая зона расположена между стенкой скважины и цилиндрической поверхностью, где движение будет пространственным, т.е. трехмерным.

Данную задачу можно применять и для нефтяных скважин с учетом скин-зоны.

Из курса подземной гидравлики известно, что уравнение фильтрации можно записать:

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr} \quad (1)$$

где  $k$  – проницаемость по газу;  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $\frac{dP}{dr}$  – градиент давления.

Известно, что для сферическо-радиальной модели площадь сечения пласта определяется:

$$F = 2\pi r^2$$

Умножая левую и правую часть уравнения фильтрации на площадь сечения пласта, имеем:

$$Q = vF = \frac{k}{\mu} 2\pi r^2 \frac{dP}{dr} \quad (2)$$

Учитывая скин-зону, можно интегрировать уравнение:

$$\frac{Q\mu}{2\pi k} \left[ \int_{R_c}^{R_s} \frac{1}{k_c} \cdot \frac{dr}{r^2} + \int_{R_s}^{R_k} \frac{1}{k} \cdot \frac{dr}{r^2} \right] = \int_{P_c}^{P_k} dP \quad (3)$$

После небольших преобразований находим:

$$\frac{Q\mu}{2\pi k} \left[ \frac{1}{R_c} \left(1 - \frac{k}{k_s}\right) + \frac{1}{R_c} \cdot \frac{k}{k_s} - \frac{1}{R_k} \right] = P_k - P_c \quad (4)$$

Отнимаем значение  $\frac{1}{R_c}$ :

$$\frac{Q\mu}{2\pi k} \left[ \frac{1}{R_s} \left(1 - \frac{k}{k_s}\right) + \frac{1}{R_c} \cdot \frac{k}{k_s} - \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_c} \right] = P_k - P_c \quad (5)$$

Проведем небольшую группировку:

$$\frac{Q\mu}{2\pi k} \left[ \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_s}\right) + \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_k}\right) \right] = P_k - P_c \quad (6)$$

Отсюда можно определить значение объемного расхода:

$$Q = \frac{2\pi k}{\mu} \cdot \frac{(P_k - P_c)}{\left[ \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_s}\right) + \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_k}\right) \right]} \quad (7)$$

Если вынести значение  $\left(\frac{1}{R_c}\right)$  за скобку, то в конечном виде с учетом скин-зоны имеем:

$$Q = \frac{2\pi k}{\mu} \cdot R_c \cdot \frac{P_k - P_c}{\left[ S + \left(1 - \frac{R_c}{R_k}\right) \right]} \quad (8)$$

где  $S$  – скин-фактор, который определяется:

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \cdot \left(1 - \frac{R_c}{R_k}\right), \quad (9)$$

где  $k_s$  – проницаемость пласта в скин-зоне;  $R_k$  и  $R_c$  – контурное и забойное давление;  $R_c$  – радиус скважины;  $R_k$  – радиус контура скважины;  $R_s$  – радиус скин-зоны.

Как видно из уравнения, объемный расход для жидкости зависит от многочисленных параметров, в том числе от скин-фактора.

Если  $S = 0$ , то имеем уравнение для несжимаемой жидкости при сферически-радиальной модели фильтрации.

Учитывая, что  $R_k \gg R_c$ , уравнение фильтрации относительно объемного расхода можно записать так:

$$Q = \frac{2\pi k}{\mu} \cdot R_c \cdot \frac{P_k - P_c}{S + 1} \quad (10)$$

## Заключение

Вопросы и задачи, рассмотренные в данной работе, относятся к базовым положениям гидродинамики пласта. Анализ показывает, что при исследовании данной модели влияние радиуса скин-зоны и коэффициента проницаемости в данной зоне влияют на величину притока жидкости.

На основе исследований установлена фундаментальная зависимость, отражающая единство и взаимосвязь между основными гидродинамическими параметрами пласта и скважины с учетом скин-фактора.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## REFERENCES

1. **Mirzadzhanzade A.Kh., Kovalev A.G., Zaitsev Yu.V.** Peculiarities of exploitation of anomalous oil fields. M.: *Nedra*, 1972, 271 p. (*in English*)
2. **Pykhachev G.B., Isaev R.G.** Underground hydraulics. M.: *Nedra*, 1973, 315 s. (*in English*)
3. **Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M.** Underground hydraulics, M.: *Nedra*, 1986, 303 s. (*in English*)
4. **Mufazimov R.Sh.** Skin factor. Historical mistakes and misconceptions in the theory of oil reservoir hydrodynamics. *Georesursy* No. 5, 2013, pp. 34-48. (*in English*)
5. **Shagiev R.G., Levchenko Sh.O.** Analysis of the components of the skin factor on the example of well surveys. Pamyatno-Sasovskoye field, N.Kh., 2002, No. 12, pp. 67-69. (*in English*)
6. **Mufazalov R.Sh.** Skin factor and its importance for evaluating borehole environmental conditions for a productive formation, *ROGTEC, Oil and Gas Magazine*. 1988, is. 19. Pp.18-36. (*in English*)
7. **Salavatov T.Sh., Dadashzade M.A., Aliyev I.N.** Analiz dvijeniya reálnix qazov v poristoy srede po lineynomu zakonu filtrasi s uchotom Skin-zon. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2018. Vol.10, №1, pp.41-44 (*in Russian*)

## **Features of Elastoplastic Deformation Powder Composites of the "Iron Cast" Type**

**A.T. Mamedov, M.Ch. Huseynov, B.B. Musurzaeva, A.A. Jafarova**

*Azerbaijan Technical University (H. Javid ave. 25, Baku, AZ 1073, Azerbaijan)*

### **For correspondence:**

Mamedov Arif / e-mail: ariff-1947@mail.ru

### **Abstract**

The features of deformation of a powder system consisting of plastic (iron) and elastic (cast iron) particles are considered. To solve the problem of deformation of such a system, the model of continuum mechanics is taken as a basis, although after compaction of a powder medium, it consists of a matrix and pores, which is called a powder or porous medium. In this case, to apply the principle of continuum, the region of space is subdivided into small subregions corresponding to the size of the powder particles. The considered mathematical problem makes it possible to solve the technological problems of pressing the axis of symmetrical products with height transitions.

**Keywords:** elastoplastic medium, iron, cast iron, discrete character, mathematical model.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_71\_79

**Received** 27.01.2023

**Revised** 18.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

### **For citation:**

*Mamedov A.T., Huseynov M.Ch., Musurzaeva B.B., Jafarova A.A.*

[Features of Elastoplastic Deformation Powder Composites of the "Iron Cast" Type]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 71-79 (in Russian)*

## **“Dəmirçuqun” tip ovuntu kompozitlərinin elastikiplastiki deformasiyasının xüsusiyyətləri**

**A.T. Məmmədov, M.Ç. Hüseynov, B.B. Musurzayeva, A.A. Cəfərova**

*Azərbaycan Texniki Universiteti (H. Cavid pr. 25, Bakı, AZ 1073, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Məmmədov Arif / e-mail: ariff-1947@mail.ru

### **Xülasə**

Məqalədə, plastiki (dəmir) və elastiki (çuqun) hissəciklərdən ibarət olan ovuntu sisteminin deformasiyasının xüsusiyyətlərinə baxılıb. Belə sistemin defromasiya məsələsinin həlli üçün əsas kimi kontinium mexanikasının modeli qəbul olunmuşdur. Baxmayaraq ki, ovuntu mühitinin sıxlaşdırılmasından sonra bu mühit matrisdən və məsamələrdən ibarət olub, ovuntu və ya məsaməli mühit adlanır. Bu halda kontinium prinsipinin tətbiqi üçün ovuntu hissəciklərinin ölçülərinə uyğun olaraq fəza sahəsi kiçik sahəaltılara bölünmüşdür. Baxılmış riyazi həll hündürlüyünə görə keçidlərə malik olan oxa simmetrik məmulların texnoloji problemlərini həll etməyə imkan verir.

**Açar sözlər:** elastiki-plastiki mühit, dəmir, çuqun, diskret xarakter, riyazi model.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_71\_79

---

УДК 621.762.4

## **Особенности упругопластического деформирования порошковых композитов типа «железочугун»**

**A.T. Мамедов, М.Ч. Гусейнов, Б.Б. Мусурзаева, А.А. Джафарова**

*Азербайджанский технический университет (пр. Г. Джавида, 25, Баку, AZ 1073, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Мамедов Ариф /e-mail: ariff-1947@mail.ru

### **Аннотация**

Рассматриваются особенности деформирования порошковой системы, состоящей из пластичной (железо) и упругой (чугун) частиц. Для решения задачи деформирования такой системы за основу взята модель механики континуума, хотя после уплотнения порошковой среды она состоит из матрицы и пор, которая называется порошковой или пористой средой. При этом для применения принципа континуума область пространства подразделена на малые подобласти, соответствующие размерам частиц порошков. Рассмотренная математическая задача позволяет решить технологические проблемы прессования осесимметричных, имеющих по высоте переходы изделий.

**Ключевые слова:** упругопластичная среда, железо, чугун, дискретный характер, математическая модель.

## **Введение**

Интенсивное проникновение идей и методов механики континуума характеризует современное состояние теории прессования порошковых композитов и дисперсных смесей. Идентичность многих вопросов прессования порошковых композитов и обработки металлов давлением позволяет обобщить многие новые проблемы и теоретические выкладки в этой области.

Между тем в связи с дискретным характером порошковых матриц и пористых тел и главным образом их способностью обратимо изменять свой объем континуальное описание этих вопросов обладает рядом особенностей.

Гипотезу сплошности используют при объяснении любой модели континуума. Исходя из этого, можно полагать, что частица среды - элементный носитель ее свойств находится в любом участке области пространства, заполненной данной средой.

В связи с тем, что в порошковой среде или каркасе пористого тела находятся как порошковые частицы, так и поры, возникает следующий вопрос: следует ли под понятием сплошности порошковой среды подразумевать сочетание порошкового тела и пор? Если применить к этим материалам известные понятия многофазных систем [1, 2], может быть сформулирован ответ на данный вопрос следующим образом: под частицей среды следует понимать область пространства, размеры которой меньше образца в целом и в то же время значительно превышают размеры отдельных частиц порошка, пор или расстояние между ними. Объединение таких областей назовем порошковой, или пористой средой. При применении принципа континуума об-

ласть пространства, в которой находится изучаемая среда, подразделяют на малые подобласти, величина которых совпадает с размерами частиц среды. Сами подобласти отождествляют с точками пространства, заполненного средой.

По упомянутым малым областям осуществляют с использованием операций осреднения (размазывания) предельный переход, связанный с определением кинематических, динамических и термических параметров, характеризующих состояние данной упругопластичной среды [3].

Методы холодного прессования со взаимным перемещением пресс-элементов получили широкое применение в порошковой металлургии при изготовлении композитных заготовок относительно сложной конфигурации. Схему прессования определяет установленный вид законов движения пресс-элементов. Теоретически недостаточно изучено влияние схемы прессования на распределение основных характеристик формируемого изделия в его объеме. Невозможно учитывать должным образом схему прессования при холодном формовании существующими методами исследования напряжений и плотностей.

В работе [4] предполагается описание в рамках представлений механики континуума поведения компактируемого металлического порошка или порошковой смеси. Принимаются общеизвестные следующие допущения:

- во все моменты времени материал изотропен;
- эффекты, приводящие к несимметрии тензора напряжений при деформировании, отсутствуют;
- между характеристиками и состоянием среды в локальной форме могут быть

описаны реологические свойства материала;

- впоследствии можно пренебречь инерционными эффектами.

На опыте использования в механике грунтов и сыпучих сред основаны первые три допущения [5]. Когда скорости приложения нагрузки небольшие, последнее допущение характерно для процесса компактирования.

Экспериментально обоснованное предположение представляет основу используемой модели сплошной среды. Это предположение говорит о том, что прессуемое в указанных условиях вещество является пластически упрочняющимся. Как добавка в шихту твердой частицы (порошок чугуна) упрочнение порошка железа, так и изменение пористости обуславливают упрочнение порошкового композита в целом.

Однозначно связаны между собой три вида упрочнения при монотонном нагружении. При этом исходные параметры порошка чугуна и значение пористости в текущий момент деформирования принимаются в качестве параметров упрочнения.

**Целью данной статьи** является построение на основе математической модели холодного прессования упругопластичной порошковой среды с учетом зависимости осевого и бокового давлений от пористости заготовки.

**Модель упрочнения композита.** Из общих закономерностей механики упрочняющейся пластическим деформированием модели композита, состоящего из порошковых частиц железа, чугуна и пор (рисунок) следует то, что в данном случае между пористостью и компонентами тензора

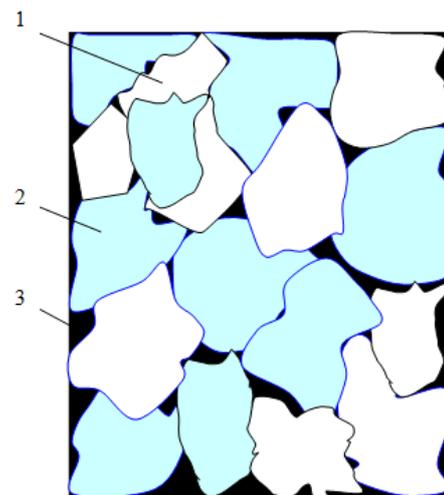
напряжений имеется соотношение, которое может быть названо в дальнейшем условием упрочнения [6]. На основании допущения об изотропии материала в этом условии содержатся инварианты тензора и дивiator напряжений, и оно имеет вид:

$$f(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (1)$$

где  $q_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij}, \quad (2)$

$$q_2^2 = \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} q_1 \delta_{ij} \right) \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} q_1 \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

$\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $\sigma_{ij}$  – тензор деформаций,  $\theta$  – пористость.



**Рисунок** – Модель структуры упругопластичного композита железочугун: 1 - железная матрица; 2 - чугун-наполнитель; 3 - пора

**Figure** – Model of the structure of an elastic-plastic composite iron-cast iron: 1- iron matrix; 2- cast iron filler; 3- time

Методы описания изменения механических свойств металлических порошков и смесей показывает, что функции  $f$  соответствует поверхность нагружения в изображающем пространстве тензора напряжений, которая является выпуклой, закрытой и имеет особенность, например ребра, либо может быть гладкой. В последнем случае

деформирование аналитически выражается выполнением двух следующих условий и происходит на ребре кусочно-гладкой поверхности.

$$\varphi(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (4)$$

$$\psi(q_1, q_2, \theta) = 0, \quad (5)$$

где  $\varphi$  и  $\psi$  - гладкие функции своих аргументов.

Нами рассмотрены схемы формирования осесимметричной задачи в цилиндрических координатах. В текущий момент деформирования рассматривается напряженно-деформированное состояние, и поэтому целесообразнее использование представления Эйлера.

В общем случае основная группа уравнений:

- уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{d\tau_{rz}}{dz} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \quad (7)$$

- уравнение неразрывности

$$\frac{d\varrho_z}{dz} + \frac{d\varrho_r}{dr} + \frac{\varrho_r}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (8)$$

Компоненты тензора напряжений, которые определяются геометрическими соотношениями:

$$e_r = \frac{d\varrho_r}{dr}, \quad (9)$$

$$e_z = \frac{d\varrho_z}{dz}, \quad (10)$$

$$e_\varphi = \frac{\varrho_r}{r}, \quad (11)$$

$$2e_{rz} = \frac{d\varrho_z}{dr} + \frac{d\varrho_r}{dz}, \quad (12)$$

По формуле [7] определяется связь между пористостью и плотностью:

$$\rho = \rho_k(1 - \theta), \quad (13)$$

где  $\rho_k$  - плотность материала порошка.

К записанной системе уравнений в случае гладкой поверхности добавляется уравнение (1), а система уравнений (2) добавляется в случае кусочно-гладкой поверхности.

Соотношения ассоциированного закона скорости деформаций связаны с напряжениями, для гладкой поверхности нагружения это имеет следующий вид:

$$e_{ij} = \mu \frac{df}{d\sigma_{ij}}, \quad (14)$$

( $e_{ij}$  - тензор скоростей деформаций), а для кусочно-гладкой принимается в форме:

$$e_{ij} = \nu \frac{d\varphi}{d\sigma_{ij}} + x \frac{d\psi}{d\sigma_{ij}}, \quad (15)$$

где  $\mu, \nu, x$  - множители Лагранжа.

К двум группам соотношений приводят в координатной форме уравнения. Эти соотношения являются скоростями девиаторов напряжений и скоростей деформаций, которые для обоих указанных видов поверхностей нагружения являются одинаковыми

$$\frac{\sigma_z - \frac{1}{3}q_1}{e_z - \frac{1}{3}e} = \frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e}, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e} = \frac{\sigma_\varphi - \frac{1}{3}q_1}{e_\varphi - \frac{1}{3}e}, \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_r - \frac{1}{3}q_1}{e_r - \frac{1}{3}e} = \frac{\tau_{rz}}{e_{rz}}, \quad (18)$$

В случае гладкой поверхности эти соотношения приводят к скалярному равенству:

$$\frac{1}{3}e \frac{df}{dq_2} = \gamma \frac{df}{dq_1}, \quad (19)$$

где

$$e_{ij} \delta_{ij} = e_i; \quad \gamma^2 = \left( e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right) \left( e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right) \quad (20)$$

В случае гладкой поверхности нагружения дальнейшая конкретизация механической модели связана с заданием конкретного вида функции  $f$ , а в случае кусочно-гладкой поверхности она связана с заданием явного вида функций  $\phi$  и  $\psi$ . Однако в осуществлении экспериментальной программы по определению величин указанных функций имеются значительные трудности, связанные со спецификой прочностных свойств пористых порошковых композитов.

В работах [8-11] указан путь решения задачи, требующей только знания зависимостей осевого и бокового давлений как функций пористости.

Для установления вида граничных условий необходимы постановка и решение конкретных задач в рамках представленной модели. Характер взаимодействий внутренней поверхности рабочих элементов пресс-формы с поверхностью прессуемого тела, а также геометрические особенности прессуемой заготовки должны отражаться в этих условиях. Для втулки внутреннего радиуса  $a$ , наружного радиуса  $b$  и конечной высоты  $h$  установлен вид этих условий.

Взяв в качестве основных координат плоскость нижнего пуансона ( $z = 0$ ) и полагая, что он не деформируемый, получаем:

$$v_z \Big|_{z=h} = 0, \quad (21)$$

Предполагаем также, что верхний пуансон ( $z = h$ ) также не деформируемый.

$$\frac{dv_z}{dr} \Big|_{z=h} = 0. \quad (22)$$

Одновременно предполагается, что по сравнению с величиной осевой деформации этих элементов такая деформация весьма мала и является упругой.

$$u_r \Big|_{r=a} = u_r \Big|_{r=b} = 0. \quad (23)$$

Тогда наружные боковые поверхности матрицы ( $p = b$ ) и внутреннего стержня ( $p = a$ ) можно отнести к поверхностям трения. В соответствии с формулой Кулона (закон внешнего трения) можно записать:

$$|\tau_{rz}| \Big|_{r=a} = -\lambda \sigma_r \Big|_{r=a}; \quad (24)$$

$$|\tau_{rz}| \Big|_{r=b} = \lambda \sigma_r \Big|_{r=b}, \quad (25)$$

где  $\lambda$  - коэффициент внешнего трения порошка с боковыми стенками матрицы и стержня.

Схемы прессования, используемые на практике, характеризуются взаимным перемещением относительно друг друга пресс-формы наружной матрицы и внутреннего стержня.

Принятие во внимание закона взаимного смещения указанных выше элементов позволяет уточнить соотношения (24) и (25).

Перемещение пресс-элементов в направлении, совпадающем с верхним пуансоном и не превосходящем его перемещение по абсолютной величине, применяемые на практике законы движения пресс-элементов соответствуют вышеуказанным, поэтому такой выбор перемещения не ограничивает общность.

На поле смещений на границе «прессуемое тело – поверхность матрицы» смещение верхнего пуансона равно  $W_1$ , а матрицы –  $W_2$ .

Компонента смещения на этой границе

$$|W_2| \leq |W_1|. \quad (26)$$

$u_z|_{r=h}$ , являющаяся функцией  $Z$  не нулевой, будет непрерывно изменяться от нуля на нижнем пуансоне до  $W_1$  на верхнем. В связи с отсутствием разрывов сплошности, а также больших градиентов рассмотренной величины  $u_z|_{r=b}$  по  $Z$ , свойственных прессованию при значительных скоростях приложения нагрузки, можно предположить, что эта функция монотонна. Эта монотонная непрерывная функция изменяется в пределах

$$0 \leq |u_z|_{r=b} \leq |W_1|. \quad (27)$$

В соответствии с промежуточным значением находится значение  $z_6$ , принадлежащее промежутку  $[0, h]$ , когда

$$u_z|_{r=b}(z_6) = W_2.$$

Образующаяся координатой  $z_6$  матрица разбивается на две составляющие:  $0 \leq Z < Z_b$  и  $Z_b < Z \leq h$ .

На первом участке в соответствии с (26) будет иметь место неравенство:

$$|u_z|_{r=b} \leq |W_2|, \quad \text{при } 0 \leq Z < Z_b,$$

а на втором 1

$$|u_z|_{r=b} \geq |W_2|, \quad \text{при } Z_b < Z \leq h.$$

Эти два неравенства означают следующее:

- при  $0 \leq Z < Z_b$ , т.е. на первом участке, порошок движется медленнее наружной матрицы;

- при  $Z_b < Z \leq h$  он движется быстрее.

Это суждение справедливо также для внутреннего стержня. Соответствующую точку на его поверхности обозначим как  $z_a$ .

Указанная трактовка специфических свойств кинематического поля на поверхностях трения имеет видимые следствия.

Рассмотрим часть поверхности порошка, движущуюся быстрее наружной поверхности матрицы.

Касательное трение порошка в этом случае о стенки матрицы препятствуют его движению в направлении движения верхнего пуансона. Для части поверхности порошка, движущегося медленнее боковых стенок матрицы, внешнее трение будет способствовать передвижению порошка, касательное усилие же будет противоположно по знаку относительно случая, рассмотренного выше [12].

С учетом этого пограничные условия (24) и (25) могут быть конкретизированы следующим образом:

$$\tau_{rz}|_{r=b} = \begin{cases} \lambda \sigma_r|_{r=b} & \text{при } Z_b < Z \leq h; \\ 0 & \text{при } Z = Z_b; \\ -\lambda \sigma_r|_{r=b} & \text{при } 0 \leq Z \leq Z_b; \end{cases} \quad (28)$$

$$\tau_{rz}|_{r=a} = \begin{cases} -\lambda \sigma_r|_{r=a} & \text{при } Z_a < Z \leq h; \\ 0 & \text{при } Z = Z_a; \\ \lambda \sigma_r|_{r=a} & \text{при } 0 \leq Z \leq Z_a; \end{cases} \quad (29)$$

Граничные условия (21) и (22) задаются способами, включающими два независимых параметра  $z_a$  и  $z_6$ . Оба эти пара-

метра, как объяснялось выше, характеризуют законы движения боковых пресс-элементов. Законы движения, в свою очередь, определяют схему прессования. Иначе говоря, предложенный способ задания граничных условий учитывает схему прессования.

Кроме граничных условий, необходимо учитывать факторы, воздействующие на процесс уплотнения порошка. При учете давления этим фактором служит равенство среднего напряжения на верхнем пуансоне. Это условие записывается следующим образом:

$$\frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b \sigma_z|_{z=h} z dz = \rho. \quad (30)$$

При прессовании до упора величину перемещения верхнего пуансона следует приравнять величине смещения верхнего слоя порошка:

$$u_z|_{z=h} = W_1. \quad (31)$$

Задание условий (30) и (31) требует наличие величин  $P$  и  $W_1$ . На практике эти величины неизвестны, поэтому они определяются из решения поставленной задачи. В этом качестве задаваемой величиной служит конечная средняя пористость. Она характеризует конечный результат процесса прессования и выражается следующим образом:

$$\theta_{cp} = \frac{2}{h(b^2 - a^2)} \int_0^h \int_a^b \theta_r dr dz, \quad (32)$$

где  $\theta_{cp}$  – среднее значение пористости после прессования.

При заданных условиях (21), (23), (28), (29) и (32), решая уравнения (28), (29) и (32) и определив распределение всех не-

известных величин (в том числе  $\sigma$  и  $u_z$ ), находим значения  $P$  и  $W_1$ .

В связи с вышеизложенным можно утверждать, что при решении поставленной математической задачи одновременно решается и технологическая проблема для прессуемого по указанной схеме изделия по конечным средней пористости и размерам. Можно определить требуемое усилие прессования, ход пуансона и распределение остаточной пористости.

Однако указанный выше метод исследования применим для осесимметричных, имеющих переходы по высоте изделий. Для этого на частях поверхностях, параллельных основанию, задаются граничные условия в соответствии с (23), а на поверхности основания - условия в соответствии с (15) и (22). Боковые поверхности характеризуются условиями (28) и (29).

## Заключение

В рамках предложенной модели механики континуума может быть решена следующая задача: по необходимым конечным размерам втулки, ее конечной средней по объему пористости и данной схеме прессования можно вычислить распределение остаточной пористости и напряжений в объеме изделия из порошкового композита

Решение краевой задачи процесса холодного прессования не зависит от вида поверхности нагружения. Оно определяется зависимостями осевого и бокового давления от пористости.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## REFERENCES

1. **Nigmatulin R.I.** Osnovy mekhaniki geterofaznyh sred. M.: *Nauka*, 1998. 336 s. (in Russian)
2. **Lomakin V.A.** Sticheskie zadachi mekhaniki tverdogo deformiruемого tela. M.: *Nauka*, 1990. 106s. (in Russian)
3. **Bahvalov N.S.** Osrednenie nelinejnyh uravnenij s chastnymi proizvodnymi s bystro oscilliruyushchimi koefficientami. - Dokl. AN SSSR, 1985, 221, №3. S.80-84. (in Russian)
4. **Shtern M.B. i dr.** Vliyanie skhemy pressovaniya na napryazhenno - deformirovanie so-stoyanie izdelij tipa vtulok // *Poroshkovaya metallurgiya*, 1998, № 3. S.1-7. (in Russian)
5. **Ivlev D.D., Bykovcev G.I.** Teoriya plastichnosti uprochnyayushchegosya tela. M.: *Nauka*, 1991. 231s. (in Russian)
6. **Boginskij L.S., Zhdanovich G.M., Yakubovskij Ch.A.** Pressovanie metallicheskih po-roshkov metodom podvizhnoj igly // *Poroshkovaya metallurgiya*. 1996. №6. S.14-20. (in Russian)
7. **Skorohod V.V.** Reologicheskie osnovy teorii spekaniya. Kiev: «*Naukova dumka*», 1992. 152s. (in Ukrainian)
8. **Shtern M.B. i dr.** Metody rascheta raspredelenij napryazhenij i poristosti // *Po-roshkovaya metallurgiya*. 1988. №3. S.25-30. (in Russian)
9. **Rodomyselskij I.D., Serdyuk G.G., Kovalev Yu.I.** Issledovanie velichiny koefficienta bokovogo davleniya pri pressovanii zheleznyh sporoshkov // *Poroshkovaya metallurgiya*. 1986. №9. S.6-10. (in Russian)
10. **Məmmədov A.T., Rüstəmovə S.M.** Dəmir əsaslı məsaməli cisimlərin plastiklik hipotezasının eksperimental yoxlanması: *Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuələri*, 2016, cild 18, №4, s.72-79. (in Azerbaijani)
11. **Mamedov A.T., Mamedov V.A.** Phenomenological approach to the plastic deformation of metallic powders in confined cavity: *AMEA-nın Xəbərləri*, 2012, №1(9), c.67-72. (in Azerbaijani)
12. **İbrahimov N.Y., Məmmədəliyev R.M., Bayramov X.B.** Lazer qurğusunda sığyrtmə sığpərgnğn səthəgnə metal ovuntu örtüyünün çəkglmə texnologgyasi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının xəbərləri*, cild 12, №1, Bakı, 2020. s.38-42. (in Azerbaijani)

## **Study of Probability-Time Characteristics of GSM Standard Mobile Telecommunication Networks**

**M.H. Hasanov, F.H. Mammadov, S.A. Sultanova, Q.A. Israfilova**

*Azerbaijan Technical University (H. Javid ave. 25, Baku, AZ1073, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Hasanov Mehman / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

**Abstract**

GSM standard mobile telecommunication networks are analyzed, their simplified physical model and vector models of these networks are developed based on it. Analytical models of these networks and methods for calculating probability-time characteristics is proposed based on the M/M/1 type single-channel mass service system, which includes Poisson flow, exponential service time and unlimited queue. Numerical values of the probability-time characteristics such as the probability of the length of the queue in the system, the average number of requests and its average stay time in the system, the average waiting time of all requests in the queue, as well as the fully normalized average value of the stay time of requests in the system are calculated and analyzed through the conducted experiments.

**Keywords:** GSM standard mobile telecommunication networks, base station subsystem, switching subsystem, mobile station subsystem, management system, operation-technical service center, vector model.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_80\_89

**Received** 07.01.2023

**Revised** 19.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Hasanov M.H., Mammadov F.H., Sultanova S.A., Israfilova Q.A.*

[Study of Probability-Time Characteristics of GSM Standard Mobile Telecommunication Networks]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 80-89 (in English)*

## **GSM standartlı mobil telekommunikasiya şəbəkələrinin ehtimal-zaman xarakteristikalarının tədqiqi**

**M.H. Həsənov, F.H. Məmmədov, Ş.A. Sultanova, Q.A. İsrailova**

*Azərbaycan Texniki Universiteti (H. Cavid pr. 25, Bakı, AZ1073, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Həsənov Mehman / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

### **Xülasə**

GSM standartlı mobil telekommunikasiya şəbəkələrinin analizi aparılmış, onların sadələşdirilmiş fiziki modeli və onun əsasında bu şəbəkələrin vektor modelləri işlənmişdir. Özündə Puasson axınını, ekponensial xidmət vaxtını və qeyri məhdud növbəni ehtiva edən M/M/1 növ bir kanallı kütləvi xidmət sistemi əsasında bu şəbəkələrin analitik modelləri və ehtimal-zaman xarakteristikalarının hesablanması metodları təklif olunmuşdur. Aparılan hesabi eksperimentlər vasitəsilə sistemdə növbənin uzunluq ehtimalı, sorğuların orta sayı və onun sistemdə orta qalma vaxtı, bütün sorğuların növbədəki orta gözləmə vaxtı, eləcə də sorğuların sistemdə qalma vaxtının tam normalaşdırılmış orta qiyməti kimi ehtimal-zaman xarakteristikalarının ədədi qiymətləri hesablanmış və onların analizi aparılmışdır.

**Açar sözlər:** GSM standartlı mobil telekommunikasiya şəbəkələri, baza stansiya alt sistemi, kommutasiya alt sistemi, mobil stansiya alt sistemi, idarə etmə sistemi, istismar-texniki xidmət mərkəzi, vektor modeli.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_80\_89

УДК 004.738.5:621.295.721.5

## **Исследование временно-вероятностных характеристик сетей мобильной связи стандарта GSM**

**М.Г. Гасанов, Ф.Г. Мамедов, Ш.А. Султанова, Г.А. Исрафилова**

*Азербайджанский Технический Университет (пр. Г.Джавида, 25, Баку, AZ1073, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Гасанов Мехман / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

### **Аннотация**

В этой статье проанализированы сети мобильной связи стандарта GSM, на их основе построены их упрощенная физическая модель и векторные модели этих сетей. Предложены аналитические модели этих сетей и методы расчета вероятностно-временных характеристик на основе одноканальной системы массового обслуживания типа M/M/1, включающей Пуассоновский поток, экспоненциальное время обслуживания и неограниченную очередь. Численные значения вероятностно-временных характеристик, таких как вероятность длины ожидания в системе, среднее количество заявок и среднее время их пребывания в системе, среднее время ожидания всех заявок в очереди, а также полностью нормализованное среднее значение времени пребывания запросов в системе рассчитано и проанализировано в результате проведенных экспериментов.

**Ключевые слова:** сети мобильной связи стандарта GSM, подсистема базовых станций, подсистема коммутации, подсистема мобильных станций, система управления, центр эксплуатации и технического обслуживания, векторная модель.

## **Introduction**

GSM (Global System for Mobile Communications) standard mobile networks are the most modern and rapidly developing field of telecommunications [1]. In these networks, the area where communication is provided is divided into separate cells, while the subscriber usually receives the same service package in each cell. Thus, when moving from one cell to another cell, subscribers can freely use communication services regardless of the area. During relocation, the connection created by subscribers (voice call, data, etc.) should not be interrupted and its continuity should be ensured, as it is ensured by the so-called "handover" device. The connection created by the subscribers is captured by the neighboring hives, as if in a relay, and the subscribers continue to exchange information over the Internet.

GSM standard mobile telecommunication networks use time division multiple access (TDMA) method. The structure of the TDMA frame includes 8 time positions in each of 124 carriers. Block and ultra-precise coding is used in order to protect against errors in radio channels during the transmission of informational data on these networks. At the small displacement speed of mobile stations, both increasing the coding efficiency and slow changing of working frequencies with a speed of 217 jumps per second during the communication session are ensured. Gaussian frequency manipulation with minimal frequency shift is used in GSM standard mobile telecommunication networks. Information processing is carried out within the framework of its intermittent transmission process, which ensures that the transmitter is connected only when the information is given,

and it is disconnected at the end of the transmission. In the case of the converter device, a pulse excitation long-term and linear prediction codec is used. The speed of information conversion in these networks is 13 kbit/s. Functional interaction of network elements is carried out through a number of interfaces. All functional components of GSM standard mobile telecommunication networks interact according to the 7<sup>th</sup> to common channel signaling system CCSS. These networks have advantages such as high-speed and high-quality information transmission (voice call, data, etc.), low cost of equipment and services, small size of user equipment, and the ability of subscribers to use mobile phones when switching to other GSM networks [2, 3]. These advantages make the selection of GSM standard mobile telecommunication networks as a research object even more urgent.

## **Setting the issue**

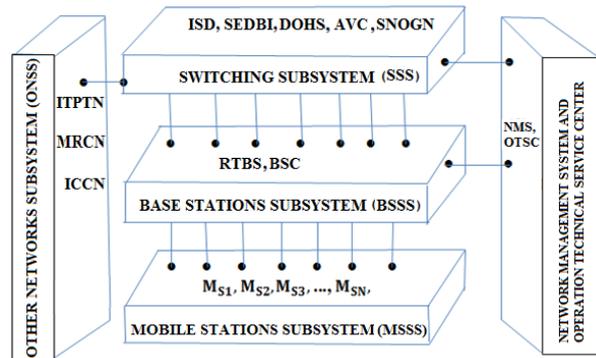
One of the main features of GSM standard mobile telecommunication networks is that their subscribers are mobile and not "bound" to a specific location, they can move within the entire network area and beyond. When it is done, as a rule, the connection is not interrupted, because the service calls are directed to the neighboring cell that is not busy and has sufficient signal level. The structure of these networks includes more elements and different types of communication channels, which make their structure makes it even more complicated. As a result of this, a large number of physical and probabilistic processes occur during the transmission of information on networks, which seriously affect their characteristics. Therefore, it is necessary to use a

mathematical apparatus that takes into account the physical and probability processes occurring in the network during the development of analytical models of these types of networks and methods of calculating probability-time characteristics. For this reason, M/M/1, which includes Poisson flow, exponential service time, and unbounded queuing, allows taking into account the physical and probabilistic processes occurring in the network in order to develop analytical models of GSM standard mobile telecommunication networks and calculation methods of probability-time characteristics. The issue of using 1 type of one-channel mass service system is set.

**The purpose of the work**

Analysis of GSM standard mobile telecommunication networks, development of their simplified physical and vector models, as well as on the basis of this M/M/1 type single-channel mass service system, which includes Poisson flow, exponential service time and unlimited queue. Proposing methods of calculating analytical models and probability-time characteristics of networks, calculating the numerical values of these characteristics through computational experiments and conducting their numerical analysis.

**Physical model of GSM standard mobile telecommunication networks.** This model includes five subsystems such as base stations subsystem BSSS, switching subsystem SSS, mobile stations subsystem, network management system and other networks subsystem [4, 5]. The physical model of GSM standard mobile telecommunication networks is shown in figure 1.



**Figure 1** – Physical model of GSM standard mobile telecommunication networks

The switching subsystem SSS performs the function of providing information and includes the authenticity verification center AVC, It includes the subscriber database ISD, the database of "Home" subscribers DOHS, the subscriber equipment database includes SEDBI and the switching nodes of the GSM network SNOGN, which perform the following functions spend [4, 5].

AVC performs verification of the authenticity of subscribers and thus ensures the prevention of unauthorized access to the network. Every time the subscriber opens the phone, makes a voice call, sends an SMS, etc., the authenticity of which is checked through mobile switching based on the information received from the AVC.

In ISD, information is stored about both active subscribers in the service area of the mobile switching center, as well as home subscribers belonging to this mobile switching center and temporarily operating in it, i.e. subscribers of other telecommunication operators or other regions.

In DOHS, both the subscribers belonging to the mobile switching center and the provided services, their status, the location of the subscribers, etc. are stored.

SEDBI stores information about mobile phone identification numbers, which are used to block stolen phones.

SNOGN manages base stations and base station controllers located in the service area of the network. Its main function is to connect network subscribers. Connections between landline telephone and intercity communication networks ICCN, as well as other communication networks are made through this node .

The base station subsystem BSSS performs all the functions related to the radio interface. Within this subsystem, reception/transmission base stations RTBS and base station controllers BSC operate. Its service area is divided and managed into hives, each covered by a RTBS. RTBS mobile stations provide a physical radio interface between CS and BSC. The RTBS includes receiver/transmitter assembly, digital processors and switching equipment of various purposes. The equipment of RTBS is built on the modular principle, which allows to increase the number of radio frequency devices. All important high-frequency equipment, digital devices and power sources work in a structurally autonomous mode. Directional antennas with a horizontal plane radiation pattern width of  $120^\circ$  are used in RTBS. The content of RTBS education includes diagnostic devices that also have an indication of status and operating modes. For testing and tuning RTBS, it is possible to connect it to an external terminal. BSC manages the distribution of several base stations and radio channels, controls the connection between base stations and the switching center of mobile communications, performs connection switching and frequency hopping adjustment, as well as makes

decisions about the quality of service of the "relay" transmission based on the information received from RTBS.

The network management system and operation-technical service center is considered the central element of the GSM standard mobile telecommunication network and includes the network management system and the operation-technical center. The management system ensures the management of this network, and the operation and maintenance center performs its operation and maintenance. The operational and technical service center ensures monitoring of network traffic and control of emergency signals occurring in all network elements, depending on the nature of the emergency that may occur in the network and its elimination automatically or with the active intervention of personnel. This system has access to both SSS and BSSS subsystems.

Mobile stations subsystem CS BSSS contains mobile stations CS and they carry out mutual communication of network subscribers.

The other networks subsystem includes the public telephone network ITPTN, the mobile radio communication network MRCN and the intercity communication network ICCN.

**Vector model of GSM standard mobile telecommunication networks.** In order to expand the physical model of these networks given in figure 1, its basic model can be written with the following vector:

$$W = [K, B, M, D, S],$$

where K, B, M, D and S are subvectors showing the switching subsystem, base stations subsystem, mobile stations subsystem, other networks subsystem, network

management system and operation and maintenance center subsystem, respectively.

The K - subvector can be written as:

$$K = [V_{AVC}, V_{ISD}, V_{DOHS}, V_{SEDBI}, V_{SNOGN}]$$

where  $V_{AVC}, V_{ISD}, V_{DOHS}, V_{SEDBI}$  and  $V_{SNOGN}$  authentication center subsets, subscriber database subsets, "Home" subscriber database subsets, subscriber equipment database subsets, and switching nodes subsets of the GSM network, respectively.

The B- subvector is equal to:

$$B = [V_{RTBS}, V_{BSC}]$$

where  $V_{RTBS}$  and  $V_{BSC}$  - are receive/transmit base station subsets and base station controller subsets, respectively.

The M-subvector can be written by the following formula:

$$M = [M_1, M_2, M_3, \dots, M_N]$$

where  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_N$  - are subsets of N number of mobile stations.

$$D = [V_{IPTN}, V_{MRCN}]$$

where  $V_{IPTN}$  are subsets of  $V_{MRCN}$  receive/transmit base stations and controller subsets of base stations, respectively.

$$S = [V_{IPTN}, V_{MRCN}, V_{ICCN}]$$

where n are  $V_{IPTN}, V_{MRCN}$  and  $V_{ICCN}$  public telephone network subsets, mobile radio communication network subsets, and long-distance communication network subsets, respectively.

**Analytical models of GSM standard mobile telecommunication networks and methods of calculating probability-time characteristics.** In order to study these networks, we consider them as single-channel M/M/1 types, which include Poisson flow, exponential service time, and unbounded queuing, let's describe it in the form of a mass service system (figure 2).

Since there is a regular flow of requests in this system, only one request falls into the queue at each time, or one request from the queue is transferred to the service channel, that is, the process of "death and reproduction" takes place in the system [6, 7]. Therefore, the mass service system given in figure 1 is depicted as a transition graph of the "death and reproduction" scheme (figure 3).

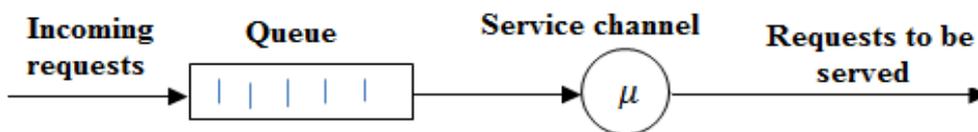


Figure 2 – Description of GSM standard mobile telecommunication networks as M/M/1 type mass

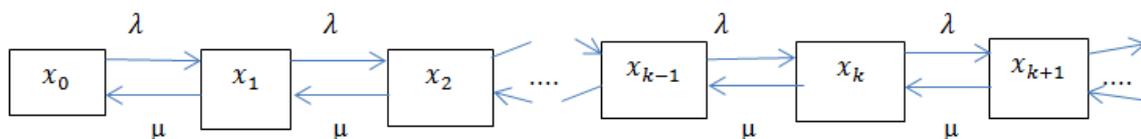


Figure 3 – M/M/1 type mass service system representation as a transition graph of the "death and reproduction" scheme

At this time, the transition states of the system take the following form:

$x_0$  -the service channel is not busy;

$x_1$  -the service channel is busy, there is no queue;

$x_2$  - the service channel is busy, there is only one request in the queue;

$x_{k-1}$  -the service channel is busy, there are  $k - 2$  requests in the queue;

$x_k$  the service channel is busy, there are  $k - 1$  requests in the queue,

$x_{k+1}$  -the service channel is busy, there are  $k$  number of requests in the queue.

Since the flow of requests to the system is stationary, the transition intensity takes a constant value [6,7], i.e.  $\lambda_k = \lambda$ ,  $k = 0,1,2,3,\dots$   $\mu_k = \mu$ ,  $k = 0,1,2,3,\dots$

At this time, the probability of having  $k$  number of requests in the system in a stationary state is determined by the following formula:

$$P_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} (\lambda / \mu) = p_0 (\lambda / \mu)^k \quad (1)$$

Since the series is cumulative in this formula, its initial value can be written as follows:

$$\begin{aligned} p_0 &= 1 / \sum_{k=1}^{\infty} (\lambda / \mu)^k = \\ &= 1 / (1 + (\lambda / \mu) / (1 - \lambda / \mu)) = \\ &= 1 - (\lambda / \mu) = 1 - \rho \end{aligned} \quad (2)$$

where  $\rho, k, \lambda$  and  $\mu$  are respectively the load of the system, the number of requests, the intensity of requests entering the system, and the intensity of serving requests.

In this case, the probability of the length of the queue resulting from  $k$  number of requests entering the system can be calculated by the following formula:

$$p_k = (1 - \rho) \rho^k \quad (3)$$

Based on the mathematical expectation of  $k$  number of discrete random quantities in the considered system [8, 9], the average number of requests in the system and its variance are determined by the following formulas, respectively:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= \sum_{k=0}^{\infty} k p_k = (1 - \rho) \sum_{k=0}^{\infty} k \rho^k = \rho / (1 - \rho), \\ \sigma^2 &= \sum_{k=0}^{\infty} (k - \bar{N})^2 p_k = \rho / (1 - \rho)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

where  $p_k$  and  $\bar{N}$  – are determined by formulas (3) and (4), respectively.

According to Little's formula, the average time of requests in the system can be determined as follows:

$$\bar{T} = \bar{N} / \lambda \quad (5)$$

If we take into account the formula (4) and  $\lambda = \rho \mu$  in (5) and solve it, we will get the final formula for the average time of requests in the system:

$$\bar{T} = 1 / \mu (1 - \rho) \quad (6)$$

The probability that there are at least  $m$  number of requests in the system, as well as the probability that there are less than the number of requests in the system are determined by the following formulas [8–10]:

$$\begin{aligned} P\{k \geq m\} &= \sum_{k=m}^{\infty} (1 - \rho) \rho^k = \rho^m, \\ P\{k < m\} &= 1 - \rho^m \end{aligned} \quad (7)$$

Now let's look at defining the characteristics of the queue in the system. The average number of requests in the system is equal to the sum of the average number of requests in the service channel and the average number of requests in the queue, that is:

$$\bar{N}_S = \bar{N}_{sk} + \bar{N}_{queue} \quad (8)$$

where is  $\bar{N}_{sk}$  the average number of requests in the service channel,  $\bar{N}_{queue}$  is the average number of requests in the queue, which defined as follows:

$$\bar{N}_{\text{queue}} = \bar{N} - \rho \quad (9)$$

where  $\bar{N}$  - is determined by the formula (4).

Calculation of the average number of requests in the queue if we consider and solve formula (4)-(9).

We get the final formula for

$$\bar{N}_{\text{queue}} = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (10)$$

Using Littla's formula [8, 9], the average waiting time of all requests in the queue  $\bar{W}_G$  can be determined as follows:

$$\bar{W}_G = \bar{N}_{\text{queue}} / \lambda = (\rho^2 / (1 - \rho)) / \lambda \quad (11)$$

where  $\bar{N}_{\text{queue}}$  - is determined by the formula (10).

If we take into account the formula (10) and  $\lambda = \rho\mu$  value in (11) and solve it, we will get the final formula for calculating the average waiting time of all requests in the queue:

$$\bar{W}_G = \rho / \mu(1 - \rho) \quad (12)$$

The fully normalized average dwell time of requests in the system indicates how many times the requests exceed the average waiting time in the service channel due to the presence of a queue in the system. In the considered M/M/1 mass service system, the fully normalized average stay time of requests in the system  $\bar{T}_{\text{norm}}$  is equal to:

$$\bar{T}_{\text{norm}} = \bar{T} / \bar{x}, \quad \bar{x} = \rho / \lambda \quad (13)$$

where  $\bar{T}$  - is determined by the formula (5),  $\bar{x}$  - is the processing time of requests in the service channel of the system.

If we consider and solve the formulas (4), (5) in (13), as a result, we will get the final calculation formula for the fully normalized average value of the requests staying time in the system:

$$\bar{T}_{\text{norm}} = 1 / (1 - \rho) \quad (14)$$

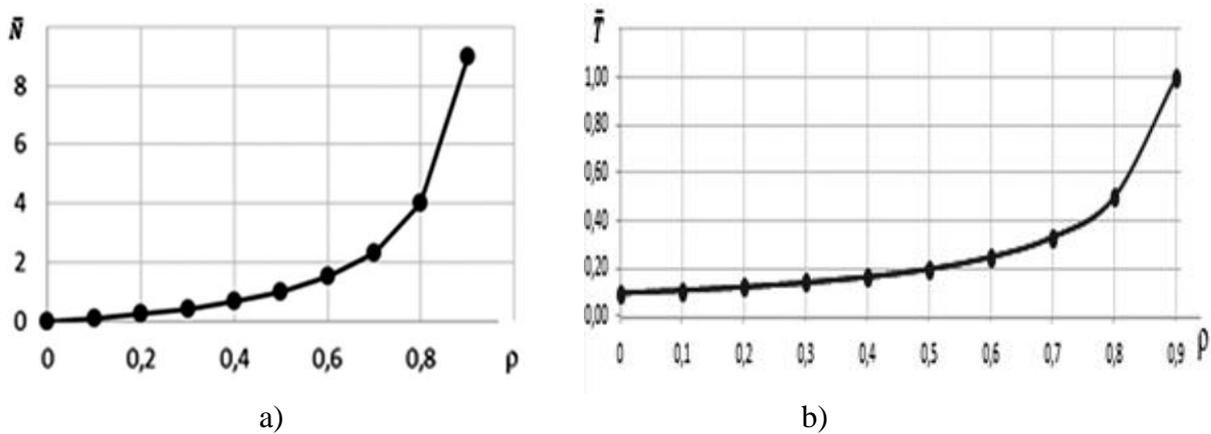
### Results of computational experiments and their analysis.

In order to determine the EZX numerical values of the probability-time characteristics of GSM standard mobile telecommunication networks, calculation experiments were carried out using Excel software. This time

$\rho = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  and  $\mu = 10$  requests/s based on formulas (4), (6), (12) and (14) using the initial data, the average number of requests in the system  $\bar{N}$ , the average waiting time  $\bar{T}$ , the average waiting time of all requests in the queue and  $\bar{W}_G$  the fully normalized average of the requests staying time in the system the numerical values of time  $\bar{T}_{\text{norm}}$  were set, the obtained results are given in table.

**Table** – Numerical values of probability-time characteristics of the system

$\rho$ EZX	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\bar{N}$	0	0.11	0.25	0.43	0.67	1.0	1.5	2.33	4.0	9.0
$\bar{T}$	0.1	0.11	0.13	0.14	0.17	0.2	0.25	0.33	0.5	1.0
$\bar{W}_G$	0	0.007	0.017	0.029	0.044	0.067	0.1	0.156	0.267	0.6
$\bar{T}_{\text{norm}}$	1.0	1.11	1.25	1.43	1.67	2.0	2.5	3.33	5.0	10



**Figure 3** – Graphs of the average number of requests in the system: a) and the average stay time b) depending on the system load

Based on the values given in Table 1, the average number  $\bar{N}$  of requests in the system and the average stay time  $\bar{T}$  graphs of dependence on the load of the system were constructed (fig. 3a, b).

The analysis of the graphs shows that the average number of requests in the system increases with the increase of the system load the dwell time increases as a whole, when the load changes in the rang  $\rho = 0 \div 0.5$ , both the average number of requests in the system and the values of the average dwell time slowly increase, and when it changes in the range of  $\rho = 0.5 \div 0.9$ , a jump is observed.

## Conclusion

GSM has analyzed standard mobile telecommunication networks as a whole, their provision of high-speed and high-quality voice and data transmission, low cost of equipment and services, small size of user equipment, and the ability of subscribers to use mobile phones when switching to other GSM networks. It is noted that it has such advantages. Information transmission processes in GSM standard mobile telecommunication networks were analyzed, a simplified physical model of these networks

and its vector models were proposed in order to expand this model.

In order to study the characteristics of GSM standard mobile telecommunication networks, they are described as a M/M/1 type single-channel mass service system containing Poisson flow, exponential service time, and unlimited queuing. and possible transition states are shown. Based on M/M/1 type mass service system, analytical models of GSM standard mobile telecommunication networks were developed and based on these models, methods for calculating their probability-time characteristics were proposed. Numerical values of the probability - time characteristics such as the probability of the length of the queue resulting from requests in the system, the average number of requests and the average stay time in the system, the average waiting time of all requests in the queue, as well as the fully normalized average value of the stay time of requests in the system, and their numerical value analysis was carried out.

## Conflict of Interests

The authors declare there is no conflict of interests related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. **Goldstein B.S.** Communication networks: Textbook for universities / B.S. Goldstein, N.A. Sokolov, G.G. Yanovsky - St. Petersburg: *BHV-Petersburg*, 2014. – 400 s. (*in English*)
2. **Busnyuk N.N.** Mobile communication systems: study guide. manual for students of the specialty 1-98 01 03 "Information security software" / N. N. Busnyuk, G. I. Melyanets. - Minsk: BSTU, 2018. - 153 p. (*in English*)
3. **Diyazitdinov R.R.** Communication systems with mobile objects. Lecture notes. - Samara: *FGOBU VPO PSUTI*, 2013. - 204 p. (*in English*)
4. **Steputin A.N.** Mobile communications on the way to 6G. In 2 volumes / A.N. Steputin, A.D. Nikolaev. - Publishing house *Infra-Inzheneria*. 2022. 796 p. (*in English*)
5. **Nusupbekov S.I.** Research of GPRS technologies based on the GSM/S.I. Nusupbekov, A.A. Nabieva, D.B. Abdykasym.–Text: direct//Actual issues of technical sciences: materials of the III Intern. scientific conf. (Perm, April 2015). - Perm: *Zebra*, 2015. Pp. 52-54. (*in English*)
6. **Nemestnikov S.M.** Fundamentals of the theory of teletraffic. Study guide./S.M. Nemestnikov, M.N. Serviceman, Yu. D. Ukraintsev - Ulyanovsk: *UIGTU*, 2016. - 154s. (*in English*)
7. **Serviceman M.N.** Collection of tasks on the theory of teletraffic: Educational manual / M.N. Serviceman. - Ulyanovsk: *UIGTU*, 2017. – 36 p. (*in English*)
8. **Cherusheva T.V.** Theory of queuing: textbook. allowance / T. V. Cherusheva, N. V. Zverovshchikova - Penza: *PSU Publishing House*, 2021. 224 p. (*in English*)
9. **Solnyshkina I.V.** Theory of mass service: textbook / I.V. Solnyshkina. - Komsomolsk-on-Amur: *FGBOU VPO "KnAAGTU"*, 2015. - 76 p. (*in English*)
10. **Mammadov F.H., Hasanov M.H., Garayev N.Ch.** Assessment of the memory buffer size in ngn networks when transferring different traffic types *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2023, Vol. 15, №1, Pp.102-109 (*in English*)

## **Assessment of The Memory Buffer Size in NGN Networks when Transferring Different Traffic Types**

**F.H. Mammadov, M.H. Hasanov, N.Ch. Garayev**

*Azerbaijan Technical University (H. Javid ave. 25, Baku, AZ1073, Azerbaijan)*

### **For correspondence:**

Hasanov Mehman / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

### **Abstract**

The matters are considered related to Poisson distribution- based voice transferred using IP packets, as well related to the assessment of the memory buffer size in NGN networks when transferring self-similar traffics. In order to assess the memory buffer size in these networks, the approaches are proposed based on Poisson distribution- based voice, as well corresponding one- channel classic mass service systems of M/M/1 and M/D/1 types reflecting exponential and deterministic distribution laws of the service time of self- similar traffics.

**Keywords:** NGN networks, voice traffic, self-similar traffic, memory buffer, memory buffer size, one- channel classic mass service systems.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_90\_96

**Received** 21.06.2022

**Revised** 18.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

### **For citation:**

*Mammadov F.H., Hasanov M.H., Garayev N.Ch.*

[Assessment of The Memory Buffer Size in NGN Networks when Transferring Different Traffic Types]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 90-96 (in English)*

## **Müxtəlif növ trafiklərin ötürülməsi zamanı NGN şəbəkələrində yaddaş buferinin həcmnin qiymətləndirilməsi**

**F.H. Məmmədov, M.H. Həsənov, N.Ç. Qarayev**

*Azərbaycan Texniki Universiteti (H. Cavid pr. 25, Bakı, AZ1073, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Həsənov Mehman / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

### **Xülasə**

IP paketləri ilə ötürülən Puasson paylanmasına əsaslanan nitq və eləcə də özünə bənzər trafiklərin ötürülməsi zamanı NGN şəbəkələrində yaddaş buferinin həcmnin qiymətləndirilməsi məsələsinə baxılmışdır. Bu şəbəkələrdə yaddaş buferinin həcmnin qiymətləndirilməsi üçün Puasson paylanmasına əsaslanan nitq, eləcə də özünə bənzər trafiklərin xidmət vaxtlarının eksponensial və deterministik paylanma qanunlarını özündə əks etdirən uyğun bir kanallı M/M/1 və M/D/1 növ klassik kütləvi xidmət sistemləri əsasında yanaşmalar təklif edilmişdir.

**Açar sözlər:** NGN şəbəkələri, nitq trafiki, özünə bənzər trafik, yaddaş buferi, yaddaş buferinin həcmi, bir kanallı klassik kütləvi xidmət sistemləri.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_90\_96

УДК 519.876.5; 004.738.5

## **Оценка объема буфера памяти в сетях NGN при передаче различных типов трафика**

**Ф.Х. Мамедов, М.Х. Гасанов, Н.Ч. Гараев**

*Азербайджанский Технический Университет (пр. Г.Джавида 25, Баку, AZ1073, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Гасанов Мехман / e-mail: mhasanovnew@gmail.com

### **Аннотация**

Рассмотрен вопрос оценки объема буфера памяти в сетях NGN при передаче речи, основанная на распределения Пуассона, а также самоподобного трафика, передаваемые IP-пакетами. Для оценки объема буфера памяти в этих сетях, предложены подходы на основе классических одноканальных системах массового обслуживания типа M/M/1 и M/D/1с соответствующими экспоненциальными и детерминированными законами распределения времен обслуживания.

**Ключевые слова:** сети NGN, речевой трафик, самоподобный трафик,буфер памяти, объем буфера памяти, одноканальные классические системы массового обслуживания.

## **Introduction**

New generation networks are universal multiservice networks that transfer infinitely many information (voice, data, video and multimedia, etc.) based on NGN packet commutation. This information creates the information flows in the networks. These information flows circulating on NGN networks are characterized by non-homogeneity and non-stationarity [1]. All the information flows exchange falling to the share of the network entry are implemented in the form of IP packets. The traffic transferred by IP packets is characterized by rate of fall (packet/ sec.), average length of the packet (bit, byte), interpacket time gap, traffic intensity (bit/ sec.), lost packets percentage and accidentally accepted packets percentage. We can conveniently classify the traffics transferred on NGN networks with the packet commutation into two groups [2]:

- Poisson distribution- based voice traffic created using IoT device.
- combined traffic with self- similar feature.

Poisson distribution- based voice traffic is characterized by ripple factor, high latency sensitivity, as well low information loss sensitivity. This traffic includes the signs of stationarity, simplicity and post- impact signs [2].

A stationarity sign indicates that the probability characteristics do not depend on the time. It does not depend for these flows on the probability on the falling of certain incidents on the time gap with the length  $t$ , as well selection of their benchmark.

A simplicity sign demonstrates the probability of falling two or more incidents on infinitely many short time gap.

Post- impact sign demonstrates that the voice information, falling on the networks entry, fall on this entry not depending of each other.

These features show that the distribution of interpacket gaps in the voice traffic is subject to exponential law, and the packets flow is subject to Poisson distribution. Therefore, the nature of the network traffic had been considered for a long time to be consistent with the Poisson process, and it was modelled in accordance with the Poisson model.

However, as multiservice networks with new packet commutation were created based on modern technologies as time went on, there was the need for the clarification of the nature of the network traffic. This matter was successfully solved by the scientists from leading Universities and Research centres all over the world. Main purpose of the researches was to develop models that characterize the characteristics of network traffic.

The network traffic was widely studied in Boston University, University of Berkeley, University of North Carolina, as well in some Western research and educational institutions. The most interesting work in this field is the research conducted by the of Boston University staff - Mark Crovella and Azer Bestavros [3]. These researches demonstrated that the packets circulating on new networks types fall on its nodes not separately, but as a whole set and are of the leap nature. Thus, based on the results obtained from the measurement of the features of real network resources, these studies proved that the network traffic has self- similar feature. For this purpose, taking into consideration self-similar features of the traffic, it was necessary to review developed network models for different networks using real data. The reviews were implemented both in local and in global networks. During this process, many interesting questions arose related to the formation of the traffic with self- similar feature. The explanation for these questions was given in more detail in the researches conducted by Mark Crovella and Azer Bestavros.

For the first time, high-precision study of the network traffic was conducted by Leland and Daniel Wilson in Ethernet local networks based on hundreds of millions of the packets [3]. These studies proved that the traffic in Ethernet local networks has self-similar feature. Main point was the demonstration of the fact that it was not always possible to model self-similar traffic through Poisson process used in the teletraffic theory.

The fact that the network traffic has self-similar feature was determined also by a number of the scientists studied Ethernet traffic in Bellcore network, such as W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson [3]. It is also revealed that computational methods based on Markov models and Erlang formulas, which were successfully used in the designing of the telephone networks, lead to unreasonable optimistic solutions for the computer networks and incorrect assessment of the load.

Another one research conducted in this field is the study of Asterisk network traffic by J.A. Taradayev and K.A. Bokhan [3]. Asterisk VoIP telephony server traffic was studied in this research. Main point of the research was determining self-similar feature of the traffic. In order to do it, statistical processing of the data was implemented on selected server using a number of the methods. As a result of the research conducted it was determined based on Hurst exponent that Asterisk network traffic has self-similar feature. Nowadays, the network modelling is successfully implemented taking into consideration self-similar feature of the traffic.

Self-similar feature of the traffic is associated with one of the types of fractal processes, i.e., with the fact that when the scale changes, the correlation structure of self-similar process remains unchanged. Fractality is a feature specific to self-similar processes. Fractal is mathematical structure of any part similar to

the whole. Fractal concept was first introduced by Franco-American mathematician Benua Mandelbrot [4]. From mathematical point of view, fractal has fractional (incomplete) value. One of main features of the fractal is its self-similarity, i.e., invariance, in other words, scale invariance. In comparison with purely random process, self-similar process seems less smooth, i.e., more unequal, in other words, has greater dispersion [4]. In such a case, important problems have emerged such as conducting perfect analysis of self-similar processes and developing the algorithms for the synthesis of the network traffic reflecting main features of these processes.

There is a number of such the algorithms nowadays. Thanks to the use of these algorithms, the transmission capacity of main channels of the networks is used relatively economically. When submitting the information flows from different sources on one main channel the frequency band of this channel is allocated to each of the sources by static or statistical submission method. In such a case, unlike static multiplexing on the frequency band of main channels of the networks, the benefit is obtained equal to certain band during statistical multiplexing. In most cases when analysing self-similar feature of the network traffic statistical multiplexing algorithm is widely used [4].

Experimental studies [5-9] show that the self-similarity of the traffic is formed due to the distribution of the size of transferred document on the network, caching effect, the setting of the users on the file submission, human factor, superposition of variety of the communications in the network, as well combination of many isolated information sources. In addition, self-similar traffic is able to be formed in the network due to the user behaviour, network scaling and reconfiguration, as well autocorrelation in non-Poisson traffic within different time scales. These reasons lead to

serious leaps in the traffic intensity in NGN networks. It should be noted that self- similar stochastic processes theory is not as advanced as Poisson processes theory. However, in comparison with Poisson model, self- similar processes model more accurately characterizes the features of the network traffic.

### Setting a problem

NGN networks designing is multi- stage process based on Poisson distribution- based speech, as well complex transfer of the traffic with self- similar features. The features of these traffics and the processes occurring when they are transferred separately have significant impact on the memory buffer size of the networks under consideration. In this regard, when designing the networks under consideration, it is necessary to assess the impact of the traffic features on their memory buffer size and to conduct their comparative analysis. Therefore, this research sets the task to assess the memory buffer size of the networks under consideration when transferring Poisson distribution- based voice, as well self- similar inbound traffic and analysing the results obtained. Such the problems are usually solved using mathematical devices such as one- channel classic mass service systems [10-12]. Therefore, in order to assess the memory buffer size in the networks under consideration in this research, Poisson distribution- based voice, as well corresponding one- channel classic mass service systems of M/M/1 and M/D/1 types reflecting the distribution laws of the service time of self- similar traffics were used.

### Research objective

Assessing the memory buffer size in MGN networks based on Poisson distribution- based voice, as well corresponding one- channel classic mass service systems of M/M/1 and M/D/1 types reflecting exponential (M type) and

deterministic (D type) distribution laws of the service time of self- similar traffics, as well conducting comparative analysis of the results obtained.

### Solution of the problem

The memory buffer size  $q_{buf}$  was assessed based on the method demonstrated in [11]. Based on this method, the memory buffer size of NGN networks is determined as follows, taking into consideration the Hurst exponent characterizing the degree of self -similarity of the traffic:

$$q_{buf} = \rho^{1/2(1-H)}/(1-\rho)^{H/(1-H)}, \quad (1)$$

whereat H is Hurst exponent,  $\rho$  – shows the network load.

If we solve this formula taking into consideration Hurst exponent  $H = 0,5$ , we shall get the following formula for one- channel classic mass service system of M/M/1 type reflecting the feature of Poisson distribution- based voice traffic and the distribution of the distribution of the service time based on exponential law:

$$q_{buf} = \rho(1-\rho). \quad (2)$$

Required buffer size in one- channel classic mass service systems of M/D/1 type reflecting self- similar feature of the network traffic and deterministic service time shall be able to determined as follows:

$$q_{buf} = (\rho^{1/(2(1-H))})/(1-\rho)^{H/(1-H)} - (\rho^2/2(1-\rho)^{H/(1-H)}). \quad (3)$$

The (3) formula is simplified for the system under consideration at Hurst exponent  $H = 0,5$  and gets the following form:

$$q_{buf} = \rho/(1-\rho) - \rho^2/2(1-\rho). \quad (4)$$

In order to determine required memory buffer size in NGN networks  $\rho = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  and  $H=0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  inputs were used based on the (1) – (4)

Formulas and computing experiments were conducted. Based on the results of conducted computing experiments, the graph of dependency  $\rho$  of required memory buffer size on  $q_{buf}$  network load was built (Fig.) and comparative analysis of obtained results was conducted based on this graph.

### Conclusion

When  $\rho$  network load and  $H$  Hurst exponent value increases, the memory buffer size of the network in M/M/1 and M/D/1 models

decreases as a whole. When the network load varies within  $\rho = 0 \div 0,6$  required memory buffer size values at Hurst exponent  $H=0,5, 0,6, 0,7$  in M/D/1, and  $H = 0,5, 0,6$  in M/M/1 get very close values. When the network load varies within  $\rho = 0 \div 0,1$  and  $\rho = 0 \div 0,4$ , the memory buffer size values in the networks under consideration at corresponding values of Hurst exponent  $H = 0,7$  and  $H = 0,8$  coincide with the values of the memory buffer size in M/M/1 and M/D/1 models when the network load varies within  $\rho = 0 \div 0,6$ .

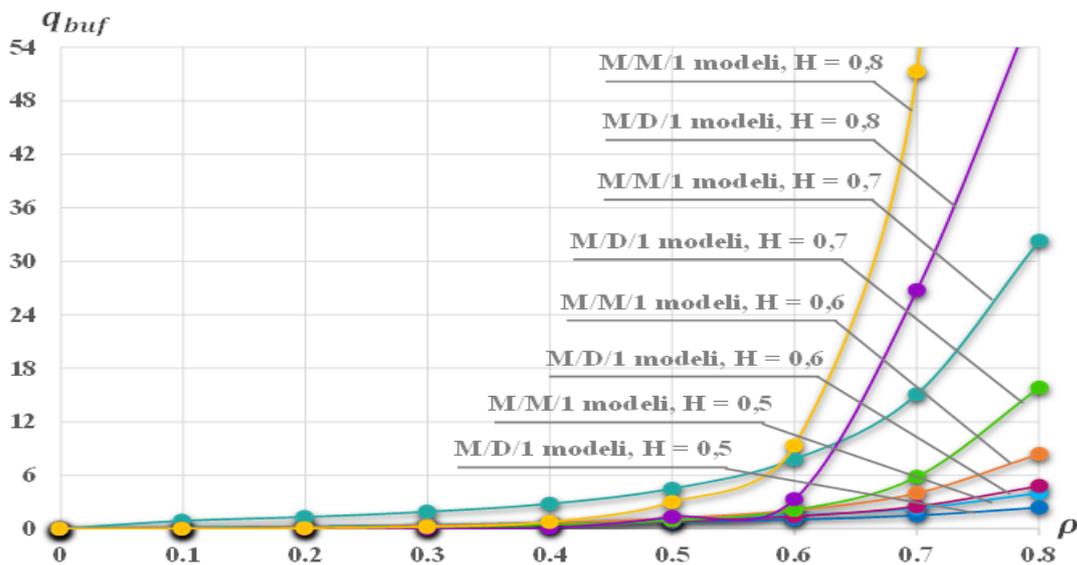


Figure – The dependency of the memory buffer size in NGN networks on the network load

Comparative analysis was conducted of required memory buffer size of the networks in M/M/1 and M/D/1 models at Hurst exponent  $H = 0, 5$  when the network load varied within  $\rho = 0 \div 0,8$ . In such a case, it was registered that, the memory buffer size of the network in M/M/1 model had been increased in average by 22.4% in comparison with M/D/1 model.

Comparative analysis was conducted of required memory buffer size of the networks in M/M/1 and M/D/1 models at Hurst exponent  $H = 0, 6; 0,7$  and  $0,8$  when the network load varied within  $\rho = 0 \div 0,8$ . In such a case, it was registered that, in comparison with M/D/1 model, required memory buffer size of the network in

M/M/1 model had been increased in average by 27.6%, 43.9% and 74.7% correspondingly at Hurst exponent  $H = 0, 6; 0,7$  and  $0,8$ .

Comparative analysis was conducted of the values obtained at  $H = 0,6, 0,7$  and  $0,8$  for the memory buffer size of the networks at M/M/1 model network load  $\rho = 0 \div 0,8$  and Hurst exponent  $H = 0,5$ . As a result of the analysis conducted, it was registered that, in comparison with the values obtained at  $H = 0,6, 0,7$  and  $0,8$ , the memory buffer size in the network at Hurst exponent  $H = 0,5$  had been more by 73,4%, 48,9% and 25,8% correspondingly at the latest Hurst exponent values.

Comparative analysis was conducted of the values obtained at  $H = 0,6, 0,7$  and  $0,8$  for the memory buffer size of the networks at M/D/1 model network load  $\rho = 0 \div 0,8$  and Hurst exponent  $H = 0,5$ . As a result of the analysis conducted, it was registered that, in comparison with the values obtained at  $H = 0,6, 0,7$  and  $0,8$ , required memory buffer size in the network at Hurst exponent  $H = 0,5$  had been more by 64,4%, 47,3% and 14,7% correspondingly at the latest Hurst exponent values.

The dependency of the memory buffer size of the network in M/M/1 and M/D/1 models on the

network load was completely analysed. As a result of the analysis conducted, it was registered that while Hurst exponent values increase in these models, the buffer memory of the network rapidly increases, which is justified by the grouping of homogenous packets and increase degree of the network load by the leap in the models under consideration.

#### **Conflict of Interests**

The authors declare there is no conflict of interests related to the publication of this article.

#### **REFERENCES**

1. **Osovsky A.V., Kutuzov D.V., Stukach O.V.** Analysis of the models of the traffic generated by IoT devices. Dynamics of systems, mechanisms and machines. Omsk. 2019. Vol. 7. No. 4.-220-226. *(in English)*
2. **Siropyatov O.A., Chechelnitsky V.Y.** Comparative analysis of theoretical approaches to the traffic modelling in terms of the compliance with new generation networks. Informatics and mathematical methods in modelling. 2014. Vol. 4, No. 1. - Pp.57-67. *(in English)*
3. **Taradayev S.A., Bokhan K.A.** Analysis of the traffic self- similarity features in Asterisk network// - Kharkiv: Information processing systems, - 2012, version 2 (100), p. 222-227. *(in English)*
4. **Bitner V.I., Mikhaylova S.S.** Networks of new generation NGN. - M.: Hot Line- Telecom, 2011. - 226 p. *(in English)*
5. **Bukashkin S.A., Buranova M.A., Saprykin A.V.** Study of the statistical features of the multimedia traffic in processing in MPLS network // Radio engineering and telecommunication systems. 2016. No. 4. p. 34-41. *(in English)*
6. **Morgaylov D.D., Ladyzhensky Y.V., Moataz Y.** Modelling of self- similar inbound traffic of the processors in NS-2 system // Informatics and computer technologies - 2012. Section 3. Internet technologies, computer networks and telecommunications. 2012. p. 232-239. *(in English)*
7. **Lozhkovsky A.G.** Queuing theory in the telecommunications: textbook/ A.G. Lozhkovsky. – Odessa: ONAS named after A. S. Popov, 2012 – 112 p. *(in English)*
8. **Samoylov M.S.** Analysis of statistical characteristics of the multimedia traffic of the aggregation node in multi-service network /M.A. Buranova, V.G. Kartashevsky, M.S. Samoylov// Radioengineering and telecommunication systems. – 2014. – No. 4. – p. 63-69. *(in English)*
9. **Tatarnikova T.M.** Statistical methods for studying the network traffic. Information and control systems, 2018, No. 5, p. 35–43. doi: 10.31799/1684-8853-2018-5-35-43. *(in English)*
10. **Melikov A.Z.** Using queuing models in multi-service wireless cellular communication networks. *HERALD of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2009. Vol. 1. No. 1.p. 76-82. *(in English)*
11. **Odoyevsky S.M., Sorokina Y.A., Khoborova V.P.** Variants of calculation of the quality indicators of service of the information flows in the communication centres of multi-service network of military destination //Works of educational institutions of communication. 2016. Vol. 2. No 4. p. 92-99. *(in English)*
12. **Hasanov M.H.** Monitoring of fiber-optic networks. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2018. Vol. 10. No. 2.p. 78-83. *(in English)*

## **Pseudorandom Number Generator Based on Linear Feedback Shift Register Algorithm**

**I.N. Aliyeva**

*Azerbaijan National Aviation Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Aliyeva Inci / e-mail: inci777@bk.ru

**Abstract**

In the article, the analysis of various schemes of pseudorandom number generators is carried out and their main shortcomings are recorded. Taking into account the identified shortcomings, the principle scheme of the pseudo-random number generator based on the linear feedback shift register algorithm is proposed to ensure the confidentiality of transmitted data in communication and control systems. The work algorithms of the control and controlled registers, which are the main parts of the proposed device and are implemented on the basis of PIC16F84A microcontrollers, are shown. At the end of the article, the general view of the device implemented based on the proposed principle scheme is reflected.

**Keywords:** Linear feedback shift register, pseudorandom number generator, pseudorandom number sequence, statistical property, confidentiality, correlation.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_97\_103

**Received** 25.10.2022

**Revised** 15.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

Aliyeva I.N.

[Pseudorandom Number Generator Based on Linear Feedback Shift Register Algorithm]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 97-103 (in Azerbaijani)

## **Xətti əks rəbitəli sürüşmə registri algoritmi əsasında psevdotəsadüfi rəqəm generatoru**

**İ.N. Əliyeva**

*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Əliyeva İnci / e-mail: inci777@bk.ru

### **Xülasə**

Məqalədə, psevdotəsadüfi rəqəm generatorlarının müxtəlif sxemlərinin analizi aparılmış və onların əsas çatışmazlıqları qeyd olunmuşdur. Müəyyən olunan çatışmazlıqları nəzərə alaraq, rəbitə və idarəetmə sistemlərində ötürülən məlumatların məxfiliyinin təmin olunması üçün xətti əks rəbitəli sürüşmə registri algoritmi əsasında psevdotəsadüfi rəqəm generatorunun prinsipial sxemi təklif olunmuşdur. Təklif olunan qurğunun əsas hissələri olan və PIC16F84A mikrokontrollerləri əsasında reallaşdırılan idarəedici və idarə olunan registrlərin iş alqoritmləri göstərilmişdir. Məqalənin sonunda isə təklif olunan prinsipial sxem əsasında reallaşdırılan qurğunun ümumi görünüşü əks olunmuşdur.

**Açar sözlər:** xətti əks rəbitəli sürüşmə registri, psevdotəsadüfi rəqəm generatoru, psevdotəsadüfi rəqəm ardıcılığı, statistik xüsusiyyət, konfidensiallıq, korrelyasiya.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_97\_103

---

УДК 004.056.5

## **Генератор псевдослучайных чисел на основе алгоритма регистр сдвига с линейной обратной связью**

**И.Н. Алиева**

*Азербайджанская Национальная академия авиации (пр. Мардакян, 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Алиева Инджи / e-mail: inci777@bk.ru

### **Аннотация**

В статье проведен анализ различных схем генераторов псевдослучайных чисел и отмечены их основные недостатки. С учетом выявленных недостатков предложена принципиальная схема генератора псевдослучайных чисел на основе алгоритма регистр сдвига с линейной обратной связью для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных в системах связи и управления. Показаны алгоритмы работы управляющего и управляемого регистров, которые являются основными частями предлагаемого устройства и реализованы на базе микроконтроллеров PIC16F84A. В конце статьи отражен общий вид устройства, реализованного по предложенной принципиальной схеме.

**Ключевые слова:** регистр сдвига с линейной обратной связью, генератор псевдослучайных чисел, последовательность псевдослучайных чисел, статистическое свойство, конфиденциальность, корреляция.

## Giriş

Hal-hazırda, müxtəlif dərəcədə təsadüfiyə malik olan ardıcılıqlar formalaşdırmaq üçün çoxlu sayda üsul və metodlar mövcuddur. Lakin praktikada bu üsulların əksəriyyəti xassələri təsadüflük tələblərinə cavab verməyən ardıcılıqlar formalaşdırır. Həmçinin burada hesablama resurslarının məhdudluğu ciddi şəkildə çətinlik törədən problemlərdən biridir. Belə ardıcılıqlar formalaşdırmaq üçün müxtəlif generatorlardan istifadə olunur [1]. Bunlardan biri statistik xüsusiyyətlərinə görə maksimal dərəcədə ideal təsadüfiyə bənzər ardıcılıqlar generasiya edən psevdotəsadüfi rəqəm generatorlarıdır (PTRG). Təsadüfi ardıcılıq generatorlarının xüsusiyyətlərinə və real vaxta yaxın rejimdə işləmək ehtiyacına görə, PTRG-nin hazırlanması və istifadəsi məsələsi çox yüksək aktuallığa malikdir. Hal-hazırda PTRG-ların müxtəlif növləri mövcuddur. Ən geniş tətbiq olunan növləri: xətti konkurent generatorlar; Fibonaççi rəqəm ardıcılıqları əsasında ləngimələrlə additiv generatorlar; orta kvadrat metodu əsasında işləyən generatorlar; xətti əks rəbitəli sürüşmə registri əsasında işləyən generatorlardır. Xətti konkurent generatorlarda tətbiq olunan riyazi modeldə parametrlər düzgün seçilmədiyi halda formalaşan ardıcılıqlar çox kiçik perioda malik olur. Fibonaççi rəqəm ardıcılıqları əsasında ləngimələrlə additiv generatorlar vasitəsi ilə əldə olunan ardıcılıqlar isə böyük perioda malik olsada, təsadüfi deyildir.

Orta kvadrat metodu əsasında işləyən PTRG-nin əsas çatışmazlığı isə generasiya olunan ardıcılıqlar arasında korrelyasiyanın mövcud olması və çox kiçik perioda malik olmasıdır. Qeyd edək ki, bu generatorlar vasitəsi ilə formalaşan ardıcılıqları əvvəlcədən proqnozlaşdırmaq mümkün olduğundan məlumat-

ların şifrlənməsi üçün tələb olunan açar formalaşdırıcısı kimi tətbiq olunurlar [2].

## İşin məqsədi

Ötürülən məlumatların konfidensiallığını təmin edən, həmçinin kifayət qədər böyük perioda, cəldiyə malik üç ədəd xətti əks rəbitəli sürüşmə registrindən ibarət PTRG-nin və onun hər üç registri üçün iş alqoritmlərinin reallaşdırılmasıdır.

## Məsələnin qoyuluşu

Xətti əks rəbitəli sürüşmə registri əsasında PTRG iki sürüşmə registrinin (idarəedici və idarə olunan) biri-biri ilə qeyri-xətti əlaqələndirilməsi prinsipi ilə işləyir [3]. Burada idarəedici registrin çıxışında məntiqi “1” səviyyəsi formalaşan zaman idarə olunan registrin çıxışında psevdotəsadüfi rəqəm ardıcılığı (PTRA) generasiya olunmağa başlayır. Əgər idarəedici registrin çıxışında məntiqi “0” səviyyəsi formalaşarsa, bu halda idarə olunan registr işə düşmür və heç bir ardıcılıq generasiya olunmur [4]. Qeyd edək ki, məhz bu səbəbdən yekunda yaranan zaman ləngimələri qurğunun əsas çatışmazlığı hesab olunur [5, 6].

## Məsələnin həlli

Qeyd olunan çatışmazlığı aradan qaldırmaq üçün üç ədəd xətti əks rəbitəli sürüşmə registri (idarəedici-XƏRSR1 və idarə olunan-XƏRSR2, XƏRSR3 registrlər) əsasında PTRG-nin prinsipial sxemi şəkil 1-də əks olunmuşdur. Burada həm idarəedici həm də idarə olunan registrlər PIC16F84A mikrokontrollerləri üzərində yığılmışdır.

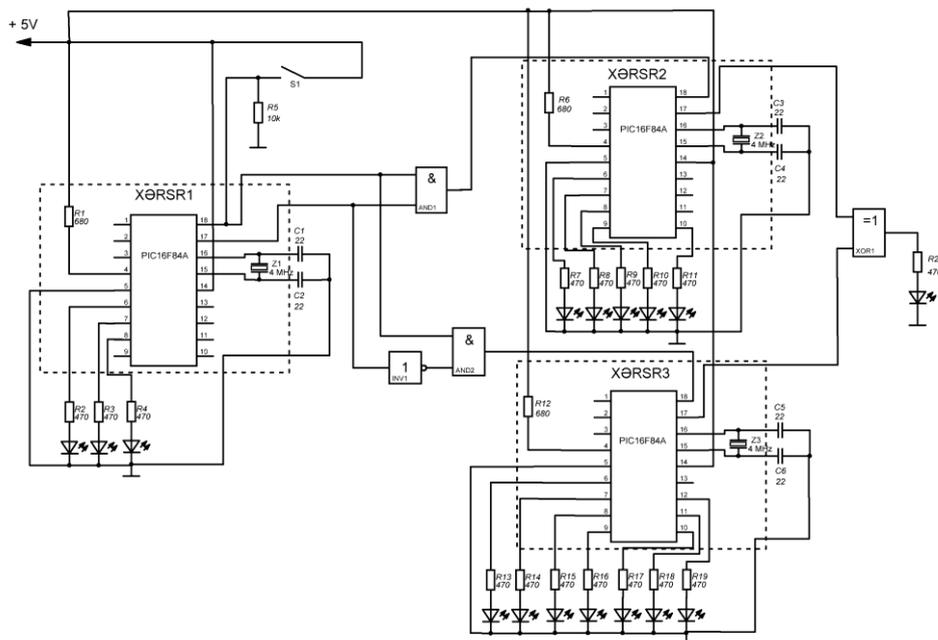
Qurğunun iş prinsipinə əsasən PIC16F84A mikrokontrollerinin (MK) 18-ci pininə (RA1 portuna) bağlanmış açar qapanan zaman burada formalaşan məntiqi “1” səviyyəsi həm idarəedici (XƏRSR1) registri iş sa-

lır, həm də hər iki “VƏ” (AND1 və AND2) məntiq elementlərinin girişlərinə verilir. Beləliklə, məntiqi “1” səviyyəsinin təsirindən sonra idarəedici (XƏRSR1) registrin çıxışında yəni, 17-ci pində (RA0 portunda) generasiya olunan ardıcılıq “VƏ” (AND1) məntiq elementinin digər girişinə verilir. Nəticədə, “VƏ” (AND1) məntiq elementinin çıxışında əldə olunan məntiqi “0” və ya “1” səviyyəsi idarə olunan (XƏRSR2) registrin 18-ci pininə (RA1 portuna) verilir. Həmçinin, burada idarəedici registrin (XƏRSR1) RA0 portunda generasiya olunan ardıcılıq eyni zamanda “YOX” (İNV1) məntiq elementinin girişinə verilir, invers olunur və “VƏ” (AND2) məntiq elementinin digər girişinə verilir. “VƏ” (AND2) məntiq elementinin çıxışında əldə olunan məntiqi “0” və ya “1” səviyyəsi idarə olunan (XƏRSR3) registrin RA1 portuna verilir. Qeyd edək ki, burada idarə olunan registrlərdən hansının girişinə (RA1 portuna) məntiqi “1” səviyyəsi verilərsə, həmin registr öz və-

ziyyətini dəyişir və yeni psevdotəsadüfi rəqəm generasiya edir.

Əgər idarə olunan registrin girişinə məntiqi “0” səviyyəsi verilərsə həmin registr əvvəlki rəqəmi yenidən təkrarlayır. Aydın ki, burada idarəedici (XƏRSR1) registrin çıxışında formalaşan PTRG idarə olunan registrlərin (XƏRSR2 və XƏRSR3) takt tezliklərini müəyyən edir. Bu proses maksimal period əldə olunana qədər periodik olaraq davam edir və hər dəfə idarəedici registrlərin çıxışında formalaşan ardıcılıqlar arasında “XOR” məntiq əməliyyatı yerinə yetirilir, yəni, yeni PTRG generasiya olunur.

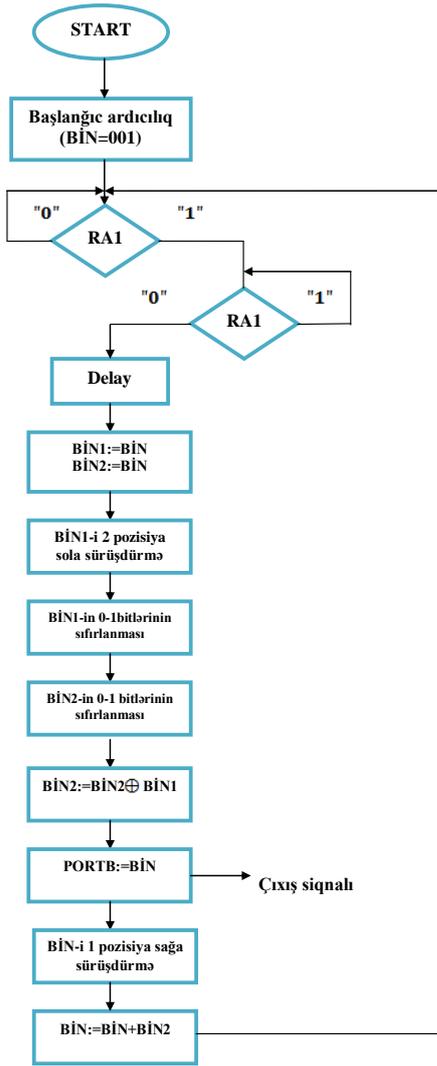
Burada (şək.1) idarəedici (XƏRSR1) registrin uzunluğunun  $L_1=3$ -ə, idarə olunan registrlərin (XƏRSR2 və XƏRSR3) uzunluqlarının isə uyğun olaraq,  $L_2=5$  və  $L_3=7$ -ə bərabər olduğunu qurğunun maksimal periodunun [7-9] ifadəsində nəzərə alsaq, reallaşdırılan qurğunun maksimal periodu  $T_{\max}=31496$ -a bərabərdir.



Şəkil 1 – Üç ədəd xətti əks rəbitəli sürüşmə registri əsasında PTRG-nin prinsipl sxemi  
Figure 1 – The principle scheme of PTRG based on three numbers of linear feedback shift registers

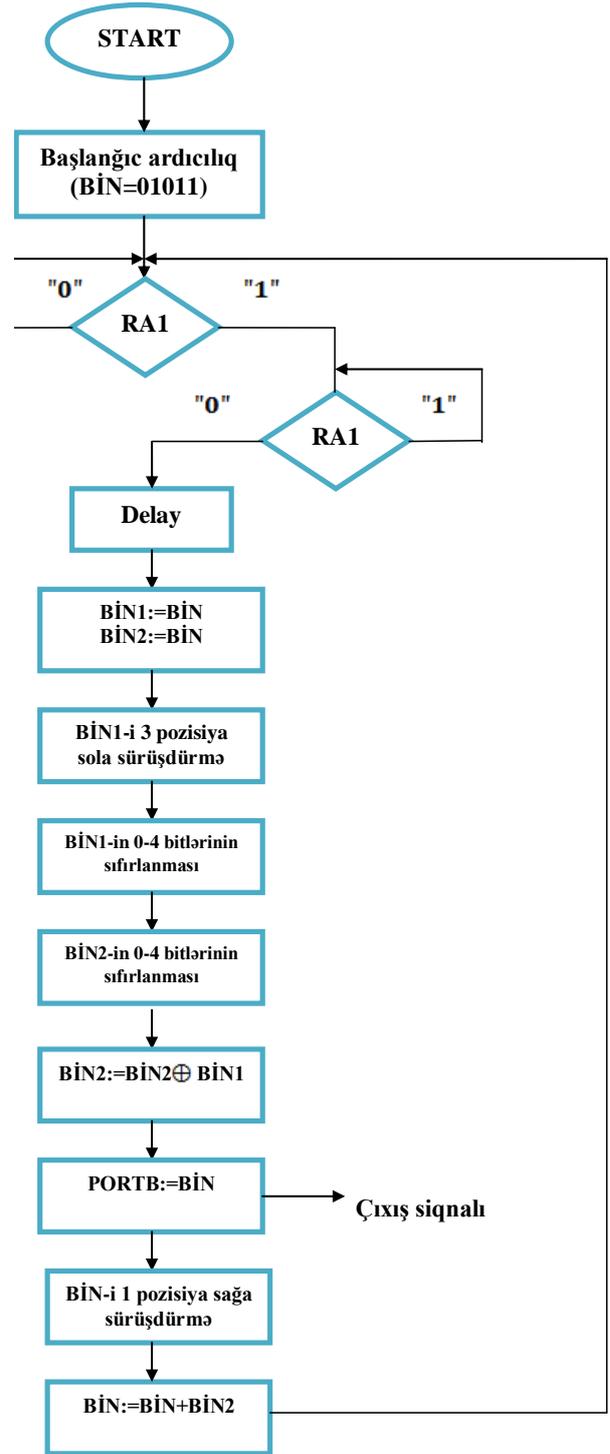
PTRG-nın PIC16F84A mikrokontrolleri əsasında reallaşdırılan idarəedici registrinin iş alqoritmi şəkil 2-də əks olunmuşdur.

və yeni bitin qiyməti hesablanır. Daha sonra sürüşmə registri bir pozisiya sağa sürüşdürülür və yeni bitin qiyməti həmin pozisiyaya qeyd olunur.

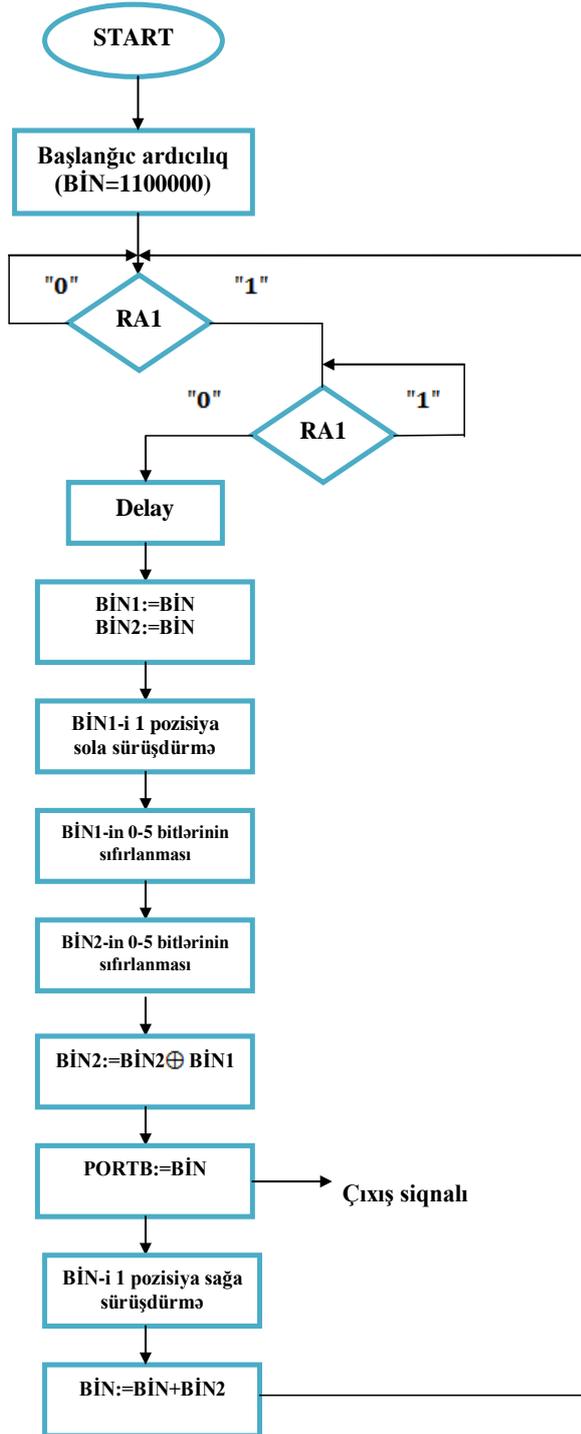


Şəkil 2 – İdarəedici registrin (XƏRSR1) iş alqoritmi  
Figure 2 – Working algorithm of the control register (LFSR1)

Alqoritmin iş prinsipi belədir: İlkin olaraq proqrama ikilik başlanğıc rəqəm (BİN) daxil edilir və idarəedici registrin RA1 portu proqram tərəfindən periodik olaraq yoxlanılır. Əgər RA1 portunda məntiqi “1” səviyyəsi formalaşarsa, bu halda daxil olunan ardıcılığın 0-cı və 2-ci xanalarında yerləşən bitlər arasında “XOR” məntiq əməliyyatı yerinə yetirilir



Şəkil 3 – İdarə olunan registrin (XƏRSR2) iş alqoritmi  
Figure 3 – Working algorithm of the managed register (LFSR2)



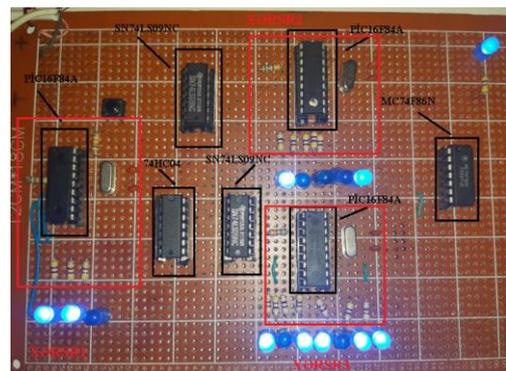
Şəkil 4 – İdarə olunan registrin (XƏRSR3) iş alqoritmi  
Figure 4 – Working algorithm of the managed register (LFSR3)

Beləliklə, hər dəfə generasiya olunan yeni bit həm çıxışa yəni, PORTB-ə ötürülür, həm də sürüşmə registrində qeyd olunur və bu proses maksimal period əldə olunana qədər periodik olaraq davam edir.

PTRG-nın PIC16F84A mikrokontrolleri əsasında reallaşdırılan idarə olunan registrlərin iş alqoritmləri isə şəkil 3 və şəkil 4-də-də əks olunmuşdur.

İdarə olunan registrlərin (XƏRSR2 və XƏRSR3) iş alqoritmləri idarəedici registrdə (XƏRSR1) olduğu kimidir. Burada XƏRSR2-də daxil olunan ardıcılığın 0-cı və 3-cü xanalarında yerləşən bitlər arasında, XƏRSR3-də isə daxil olunan ardıcılığın 5-ci və 6-cı xanalarında yerləşən bitlər arasında “XOR” məntiq əməliyyatı yerinə yetirilir və yeni bitin qiyməti hesablanır. Daha sonra sürüşmə registri bir pozisiya sağa sürüşdürülür və yeni bitin qiyməti həmin pozisiyaya qeyd olunur. Beləliklə, hər dəfə generasiya olunan yeni bit həm çıxışa yəni, PORTB-ə ötürülür, həm də sürüşmə registrində qeyd olunur və bu proses maksimal period əldə olunana qədər periodik olaraq davam edir.

Təklif olunan qurğunun ümumi görünüşü şəkil 5-də təsvir olunmuşdur.



Şəkil 5 – Üç ədəd xətti əks rəbitəli sürüşmə registri əsasında PTRG-nin ümumi görünüşü  
Figure 5 – General view of PTRG based on three linear feedback shift registers

Burada XƏRSR1, XƏRSR2, XƏRSR3 registrlərinin və reallaşdırılan qurğunun çıxışında (MC74F86N-XOR məntiq elementinin çıxışı) əldə olunan ardıcılıqları vizual olaraq görmək üçün işıq diodlarından istifadə olunmuşdur.

### Nəticə

Üç ədəd xətti əks rəbitəli sürüşmə registri əsasında reallaşdırılan psevdotəsadüfi rəqəm generatoru kifayət qədər böyük cəldliyə və perioda malikdir. Burada həm idarəedici həm də idarə olunan registrlərin uzunluqlarını daha böyük seçərək generasiya olunan ardıcılıqların periodunu daha da artırmaq mümkündür. Həmçinin daha böyük takt tezliyinə malik mikrokontrollerdən istifadə edərək qurğunun

cəldliyini daha çox artırmaq olar. Qeyd edək ki, qurğu reallaşdırılan zaman “zaman ləngiməsi” kimi çatışmazlıq aradan qaldırıldığı üçün real vaxta yaxın rejimdə işləməyə imkan verir və ötürülən məlumatların konfidensiallığının təmin olunması üçün ən optimal vasitələrdən biri kimi tətbiq oluna bilər.

Burada idarəedici və idarə olunan registrlərinin başlanğıc qiymətlərini təsadüfi seçərək formalaşan ardıcılıqların kriptodayamıqlılığını və statistik xüsusiyyətlərini mükəmməlləşdirə bilərik.

### Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

## REFERENCES

1. **Akhmetov B.A., Korchenko A.G., Sidenko V.P., Dreis Yu.A., Seilova N.A.** Applied cryptology. Almaty, 2015. - 496 p. (in English)
2. **Budko M.B., Budko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A.** Methods for generating and testing random sequences - St. Petersburg: ITMO University, 2019. - 70 p. (in English)
3. **Kanso A.A.** Modified clock-controlled alternating step generator. Computer Communications 32, Elsevier, pp. 787799, 2009. (in English)
4. **Əliyeva İ.N.** Stop and go prinsipi əsasında işləyən psevdotəsadüfi ədəd formalaşdırıcısı. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuələri. Bakı. 2022. №1, s. 29-36 (in Azerbaijan)
5. **Englund H. and Johansson T.** A new distinguisher for clock controlled stream ciphers. In H. Gilbert and H. Handschuh, editors, Fast Software Encryption - FSE 2005, volume 3557 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 2005. Pp. 181–195. (in English)
6. **Khazaei S., Fisher S., Meier W.** Reduced complexity attacks on the alternating step generator. Proceedings of SAC'07, , Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 1-16, 2007. (in English)
7. **Ndaw A., Djiby S., Sanghar.** Construction of Maximum Period Linear Feedback Shift Registers (LFSR) (Primitive Polynomials and Linear Recurring Relations British Journal of Mathematics & Computer Science 11(4): 1-24, 2015, Article no.BJMCS.19442 ISSN: 2231-0851, p. 24 (in English)
8. **Golic J., Menicocci R.** Correlation analysis of the Alternating Step Generator. Design, Codes and Cryptography, 31, pp. 51-74, Kluwer Academic Publishers, 2004. (in English)
9. **Rzaev H.N., Gasanov R.A.** Analiz protokolov bezopasnosti i dostovernosti v perspektivnyh sistemah predostavleniya uslug svyazi. Vestnik Azerbajdzhanskoj Inzhenernoj Akademii, 2016, T. 8, №4, s. 83-98 (in Russian).

# **TOPSIS Method and Fuzzy Rules on the Decision Making Based**

**K.A. Mammadova**

*Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlıq pr. 20, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Mammadova Kifayat / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

**Abstract**

In recent times, the development of the TOPSIS method in complex and different directions allows people to work more efficiently in various fields. As an example of these areas, in the processing, analysis and application of big data, we can show the selection of the best ones according to all possible parameters of web browsers, the selection of the most important skills of managers, the selection of the most suitable students for the majors, etc. The realization of such works has a positive effect on people in terms of time and choice. With the help of TOPSIS, it is possible to choose the closest to the ideal among them, while being able to evaluate the possible parameters of various nature, which are considered to be modern problems, without clear information. That is, the better one is chosen from the given alternatives. Although these methods and rules make people's work easier, on the other hand, they also present problems related to managing uncertainties. Thus, information that is unknown to us, that is, inaccurate or uncertain, cannot be managed simply by TOPSIS. Therefore, it is necessary to apply the TOPSIS method not alone, but with fuzzy rules. That is, after adopting fuzzy values for alternatives and criteria, a suitable mathematical model is created.

**Keywords:** Z-numbers, fuzzy logic, fuzzy rules, TOPSIS model, linguistic variables, Big Data, database.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_104\_110

**Received** 23.01.2023

**Revised** 18.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

**For citation:**

*Mammadova K.A.*

[TOPSIS Method and Fuzzy Rules on the Decision Making Based]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 104-110 (in Azerbaijani)*

## **TOPSIS metodu və qeyri-səlis qaydalar əsasında qərarların qəbulu**

**K.A. Məmmədova**

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

### **Yazışma üçün:**

Məmmədova Kifayət / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

### **Xülasə**

Son dövrlərdə TOPSIS metodunun mürəkkəb və müxtəlif istiqamətli inkişafı insanlar üçün müxtəlif sahəli işlərdə daha rahatdır. Bu sahələrə misal kimi böyük verilənlərin emalı, analizi və tətbiqi işlərində, veb brauzerlərin bütün mümkün parametrlərinə görə ən yaxşılarının seçilməsini, menecerlərin ən əhəmiyyətli bacarıqlarının seçilməsini, ixtisaslara ən uyğun tələbələrin seçilməsini və s. bu kimi proseslər misal göstərə bilər. Bu kimi işlərin gerçəkləşməsi insanlara zaman və seçim cəhətdən müsbət təsir göstərir. TOPSIS-in köməyi ilə müasir prolemlərdən sayılan müxtəlif təbiətli, səlis məlumatları olmayan mümkün parametrləri qiymətləndirə bilməklə yanaşı onların içərisində ideala ən yaxınını seçmək olur. Yəni verilmiş alternativlərdən daha yaxşısı seçilir. Bu metod və qaydalar insanların işini yüngülləşdirsə də, digər tərəfdən qeyri-müəyyənlikləri idarə etməklə bağlı problemləri də ortaya çıxarır. Belə ki, bizə məlum olmayan, yəni qeyri-dəqiq və ya qeyri-müəyyən məlumatlar sadəcə TOPSIS-lə idarə oluna bilmir. Ona görə də TOPSIS metodunu tək deyil, qeyri-səlis qaydalarla tətbiq etmək lazım gəlir. Yəni alternativlər və meyarlara qeyri-səlis qiymətlər mənimsədildikdən sonra uyğun riyazi model yaradılır.

**Açar sözlər:** Z-ədədlər, qeyri-səlis məntiq, qeyri-səlis qaydalar, TOPSIS modeli, lingvistik dəyişənlər, Big Data, verilənlər bazası

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_104\_110

УДК 338.46

## **Метод TOPSIS и принятие решений на основе нечетких правил**

**К.А. Мамедова**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 20, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

### **Для переписки:**

Мамедова Кифайат / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

### **Аннотация**

В последнее время развитие метода TOPSIS в комплексе и по разным направлениям позволило людям более эффективно работать в различных областях. В качестве примера этих направлений при обработке, анализе и применении больших данных можно показать подбор лучших по всем возможным параметрам веб-браузеров, отбор наиболее важных навыков менеджеров, подбор наиболее подходящих студентов для специальностей и т. д. Осуществление таких работ положительно влияет на людей с точки зрения времени и выбора. С помощью TOPSIS можно выбрать среди них наиболее близкие к идеалу, имея при этом возможность без четкой информации оценить возможные параметры различной природы, считающиеся современными проблемами. То есть из предложенных альтернатив выбирается лучшая. Хотя эти методы и правила облегчают работу людей, с другой стороны, они также создают проблемы, связанные с управлением неопределенностями. Таким образом, информация, которая нам неизвестна, то есть неточна или неопределенна, не может управляться TOPSIS. Поэтому необходимо применять метод TOPSIS не один, а с помощью нечетких правил. То есть после принятия нечетких значений альтернатив и критериев создается подходящая математическая модель.

**Ключевые слова:** Z-числа, нечеткая логика, нечеткие правила, модель TOPSIS, лингвистические переменные, большие данные, база данных.

## **Giriş**

Müasir dövrdə cəmiyyətin tələbatı və tələbləri artdıqca TOPSIS metodunun təkmilləşdirilməsi məsələsi gündəmdə xüsusi yer tutmağa başladı. Beləliklə də, Qeyri-səlis TOPSIS, NR-TOPSIS, Z-TOPSIS kimi modelləşdirmə üsulları yaradıldı. TOPSIS-dən fərqli olaraq onlar: qeyri-səlis mühiti idarə etməklə əlaqəli, namizədlər çoxluğunun silinməsi, əlavə edilməsi, dəyişdirilməsi nəticəsində etibarlılığın qorunması ilə bağlı, çox meyarlı qərar qəbul etmə problemlərini asanlaşdırmaqla əlaqəli funksiyalar yerinə yetirirlər.

## **İşin məqsədi**

Bu məqalədə məqsəd müasir dövrün tələbinə uyğun olaraq, TOPSIS-in təkmilləşdirilməsi yolu ilə qeyri-səlis qaydalar və Z ədədlər tətbiq etməklə alternativlərin qiymətləndirilməsi, onlardan ən yaxşısının seçilməsidir. Bu səbəbdən də, ən yaxşı alternativin seçilməsi Big Data-nın təhlükəsizliyi riski, nəqliyyat dayanıqlığı kimi müasir problemlərdən istifadə etməklə metodun realizasiyasına nail olunmuşdur.

Bu işdə, qeyri-səlis ədədlər üzərində əməllərin köməyi ilə qeyri-səlis TOPSIS yanaşması Z ədədlərin konsepsiyası ilə əlaqələndirilmiş, qeyri-səlis qərar matrisi qurularaq qeyri-səlis TOPSIS yanaşması qeyri-müəyyənlik şərtləri daxilində dayanıqlı nəqliyyat sistemlərinin qiymətləndirilməsi üçün riyazi model yaradılmışdır [1, 2].

Qeyri-müəyyənlik şəraitində qərar qəbul etmə problemi və xüsusən də linqvistik qeyri-müəyyənliyi idarə etmə ilə əlaqəli problemlər ümumi problemlərin aktual mövzularından biridir. Çox vaxt qərar qəbul etmə problemlərini həll edərkən yalnız mütəxəssislər tərəfindən linqvistik qiymətləndirmə

şəklində verilən məlumatlarla kifayətlənmək məcburiyyətində qalıraq. Bu şərtlər daxilində qərar qəbul etmə modellərinin inkişafı linqvistik qiymətləndirmələrə xas olan qeyri-müəyyənliyin lazımi dərəcədə nəzərə alınmasını tələb edir.

Davamlı olaraq nəqliyyat sistemləri dövrümüzün daha da vacib zərurətinə çevrilir. İllər ərzində nəqliyyat fəaliyyətlərinin sayında gözlənilməz bir artım olmuşdur və bu tendensiyanın yaxın illərdə də davam edəcəyi gözlənilir. Aydın ki, bu hadisələr müasir şəhərlərdə həyat keyfiyyətini aşağı salan hava çirkliliyi, səs-küy və s. kimi ekoloji xərcləri yaradır. Bu böhranın öhdəsindən gəlmək üçün bələdiyyə hökumətləri təkcə səmərəli, etibarlı və qənaətli deyil, həm də ətraf mühitə uyğun dayanıqlı nəqliyyat sistemlərinə investisiya yatırırırlar. Nəqliyyatla bağlı qərar qəbul edənər üçün bu cür davamlı nəqliyyat sistemlərini necə qiymətləndirmək və seçmək problem sayılır. Ona görə də qismən və ya natamam məlumat (qeyri-müəyyənlik) şəraitində dayanıqlı nəqliyyat sistemlərinin seçilməsi üçün çox meyarlı qərar qəbul etmə yanaşmasını təqdim edirik. Təklif olunan yanaşma üç mərhələdən ibarətdir. Birinci addımda nəqliyyatın davamlılığını qiymətləndirmək üçün meyarlar təyin edirik. İkinci mərhələdə mütəxəssislər potensial alternativlərə, seçilmiş meyarlara görə linqvistik qiymət verirlər. Qeyri-səlis TOPSIS dayanıqlılığını qiymətləndirmək və ən yaxşı alternativ seçmək üçün ümumi balların generasiyası istifadə olunur. Üçüncü addımda yoxlama analizi aparılır. Həmin analiz çəkili əmsalların təsirini təyin etmək üçün qərar qəbul etmə prosesində aparılır. Yanaşmanın tətbiq oluna biləcəyini göstərmək üçün riyazi təsvir verilir. Təklif olunan işin gücü-onun praktiki olaraq tətbiq oluna bilməsi və qeyri-

müəyyənlik şəraitində yüksək keyfiyyətli həllər qəbul etmə qabiliyyətidir. Davamlı inkişaf müasir nəqliyyatla bağlı qərar qəbul edənlər üçün vacib bir mövzudur. Dayanıqlığın necə dəqiq bir şəkildə müəyyənləşdirilə biləcəyinə və ölçülməyinə dair bir çox müzakirə aparılıb. Brundtland Komissiyası (Birləşmiş Millətlər Təşkilatının Ətraf Mühit və İnkişaf üzrə Dünya Komissiyası, 1987) dayanıqlığı, gələcək nəsillərin öz ehtiyaclarını ödəmək qabiliyyətinə xələl gətirmədən bu günün ehtiyaclarına cavab verən inkişaf olaraq təyin edir. Dünya Bankı (1996), Loo (2002) və Schipper (2003) dayanıqlığı ölçmək üçün iqtisadi, ekoloji və sosial bərabərliyin “üçlü nəticəsi”-ndən istifadə edirlər. Bu təriflərdən istifadə edərək dayanıqlı nəqliyyat, gələcək nəsillərin nəqliyyat ehtiyaclarını ödəmək qabiliyyətinə xələl gətirmədən bugünkü nəqliyyat ehtiyaclarını ödəməyə qadir nəqliyyat kimi qəbul edilə bilər (Qara, 1996; Richardson, 2005). Ekoloji cəhətdən “təmiz” (ekoloji zərərsiz) nəqliyyat nümunələrinə: enerjiyə qənaətli nəqliyyat vasitələri, həmçinin biodizel, elektrik və s. kimi təmiz yanacaq nəqliyyat vasitələri və s. aiddir. Dayanıqlı nəqliyyat mərkəzi (1997) dayanıqlı nəqliyyat sistemini təyin edir [3-5].

### Məsələnin qoyuluşu

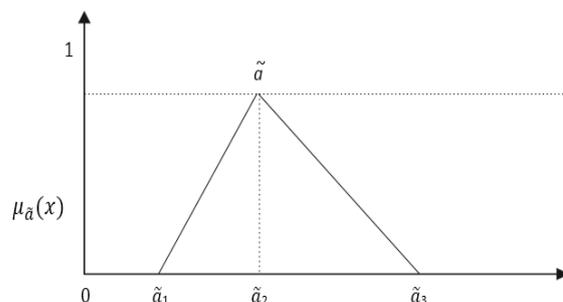
Qeyri-müəyyənlik, qərar qəbul etmə proseslərində informasiya çatışmazlığı olduqda yaranır. Qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi də qeyri-müəyyənliyi modelləşdirmək üçün istifadə olunur. (Lütfi Zadə, 1965). Qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsində linqvistik termlərdən qərar qəbul edənlərin ən yaxşı seçiminə istinad etmək üçün istifadə olunur. Məsələn, bazar ertəsi günündə yağış yağma ehtimalı linqvistik baxımdan yüksək, çox yüksək, aşağı və s. kimi təqdim oluna bilər.

Bu yazıda, davamlı nəqliyyat üçün, qərar qəbul etmə prosesini modelləşdirmək üçün qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsindən istifadə edəcəyik, çünki modelin bəzi parametrləri analitik olaraq müəyyən edilə bilməz və ekspert rəyini tələb edir. Məsələn, mobillilik, bərabərlik, kompetentlik, xidmət keyfiyyəti və s. qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsinin bəzi bir-birilə əlaqəli tərifləri (Buckley, 1985; Dubois & Prade, 1982; Kaufmann & Gupta, 1991; Klir & Yuan, 1995; Pedrycz, 1994; Zadeh, 1965; Zimmermann, 2001) aşağıdakı kimi təqdim olunur.

**Tərif 1.**  $X$  mühakimələr fəzasının altçoxluğu olan qeyri-səlis  $A$  çoxluğu verilib.  $A$  çoxluğu  $X$  fəzasında  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  mənsubiyyət funksiyası ilə xarakterizə olunur. Həmin mənsubiyyət funksiyası  $X$  çoxluğundan olan  $x$  elementinə qarşı  $[0,1]$  parçasından bir element qarşı qoyur.  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  funksiyasının qiyməti  $x$  elementinin  $\tilde{a}$ -ya mənsub olma dərəcəsi adlanır (Kaufmann and Gupta).  $\tilde{a}$  qiyməti birə nə qədər yaxın olarsa,  $x$ -in  $a$ -ya aid olma dərəcəsi bir o qədər də yüksək olar.

**Tərif 2.** Üçbucaq qeyri-səlis  $\tilde{a}$  ədədi üç komponentli  $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)$  kimi ifadə olunur. Şəkil 1-də qeyri-səlis üçbucaqlı  $\tilde{a}$  ədədi təsvir edilmişdir.

Konseptual və hesablama sadəliyi sayəsində üçbucaqlı qeyri-səlis ədədlər praktik tətbiqlərdə çox istifadə olunur (Klir & Yuan, 1995; Pedrycz, 1994; Yeh & Deng, 2004).



Şəkil 1 – Üçbucaqlı qeyri-səlis ədəd  
Figure 1 – Triangular fuzzy number

Üçbucaqlı qeyri-səlis  $\tilde{a}$  ədədinin  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  mənsubiyyət funksiyası aşağıdakı kimi təyin olunur :

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases}$$

Burada  $a_1, a_2, a_3$  üçün  $a_1 < a_2 < a_3$  ödənilir.  $x$  dəyişəninin  $a_2$  nöqtəsində  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  mənsubiyyət funksiyası özünün maksimum qiymətini alır.  $\mu_{\tilde{a}}(x) = 1$  olduqda, belə qiymətləndirmə hesabi verilənlərin ən çox ehtimal olunan qiymətini göstərir.  $x$  dəyişəninin  $a_1$  nöqtəsində  $\mu_{\tilde{a}}(x)$  mənsubiyyət funksiyası özünün minimal qiymətini alır.  $\mu_{\tilde{a}}(x) = 0$  belə qiymətləndirmə hesabi verilənlərin ən az ehtimal olunan qiymətidir.  $a_1$  və  $a_3$  sabitləri məlumatları qiymətləndirmək üçün mövcud çoxluğun aşağı və yuxarı sərhədləridir. Bu sabitlər qiymətləndirmə məlumatlarının qeyri-müəyyənliyini əks etdirir.  $[a_1, a_3]$  “dar” olduqda, qiymətləndirmə məlumatlarının qeyri-səlisliyi aşağı olur.

**Xəssə 1.** İki qeyri-səlis üçbucaqlı  $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)$  və  $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)$  ədədləri üçün əsas əməliyyatlar aşağıdakı kimi ifadə olunur [1-3]:

1) üçbucaqlı iki qeyri-səlis ədədin cəmi:

$$\tilde{a}(+) \tilde{b} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3), \\ a_1 \geq 0, b_1 \geq 0$$

2) üçbucaqlı İki qeyri-səlis ədədin hasil:

$$\tilde{a}(\times) \tilde{b} = (a_1 \times b_1, a_2 \times b_2, a_3 \times b_3), \\ a_1 \geq 0, b_1 \geq 0$$

3) üçbucaqlı iki qeyri-səlis ədədin fərqi:

$$\tilde{a}(-) \tilde{b} = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3), \\ a_1 \geq 0, b_1 \geq 0$$

4) üçbucaqlı iki qeyri-səlis ədədin nisbəti:

$$\tilde{a}(/) \tilde{b} = (a_1/b_1, a_2/b_2, a_3/b_3),$$

$$a_1 \geq 0, b_1 \geq 0$$

5) üçbucaqlı qeyri-səlis ədədin tərsi:

$$\tilde{a}^{-1} = (1/a_1, 1/a_2, 1/a_3), \\ a_1 \geq 0$$

6) üçbucaqlı qeyri-səlis ədədin əksi:

$$\tilde{a} = (-a_1, -a_2, -a_3), \quad a_1 \geq 0.$$

**Xəssə 2.** Hər hansı həqiqi  $k$  və üçbucaqlı qeyri-səlis  $\tilde{a}$  ədədi üçün iki ədəd üzərində əməliyyatlar aşağıdakı kimi ifadə olunur [6, 7]:

1) üçbucaqlı qeyri-səlis ədədin sabitə hasil:

$$K * \tilde{a} = (ka_1, ka_2, ka_3), \quad a_1 \geq 0, \\ k \geq 0$$

3) sabitin üçbucaqlı qeyri-səlis ədədə nisbəti:

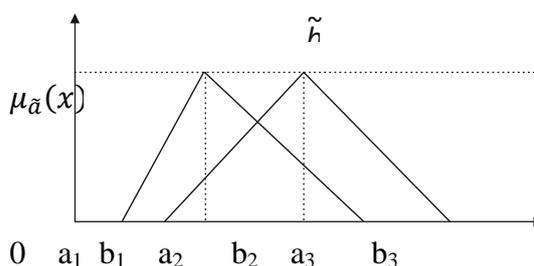
$$\frac{K}{\tilde{a}} = \left( \frac{k}{a_1}, \frac{k}{a_2}, \frac{k}{a_3} \right), \quad a_1 \geq 0, k \geq 0$$

4) üçbucaqlı qeyri-səlis ədədin sabitə nisbəti:

$$\frac{\tilde{a}}{K} = \left( \frac{a_1}{k}, \frac{a_2}{k}, \frac{a_3}{k} \right), \quad a_1 \geq 0, k \geq 0$$

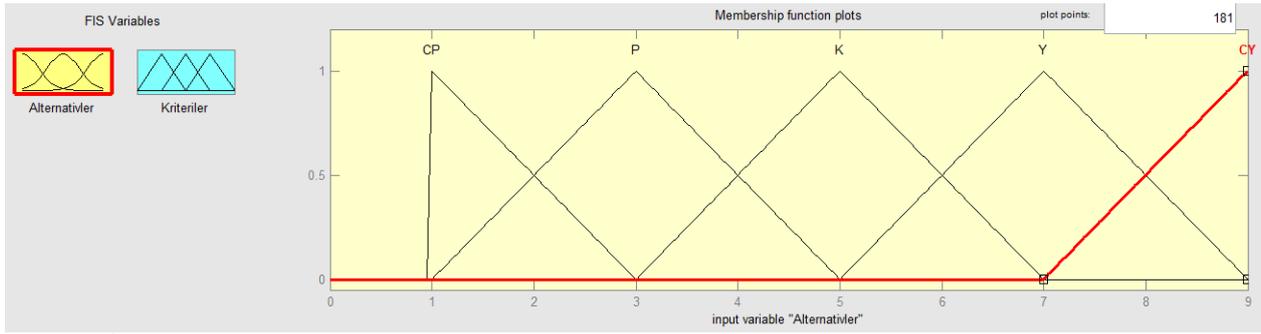
Yuxarıda aparılan əməliyyatların isbatı sadədir.

**Xəssə 3.** Üçbucaqlı iki qeyri-səlis  $(\tilde{a}, \tilde{b})$  ədədi və hər hansı həqiqi  $k$  ədədi üçün bu iki ədədin kommutativ əməliyyatları aşağıdakı kimi ifadə olunur [6] (şəkl. 2-4):

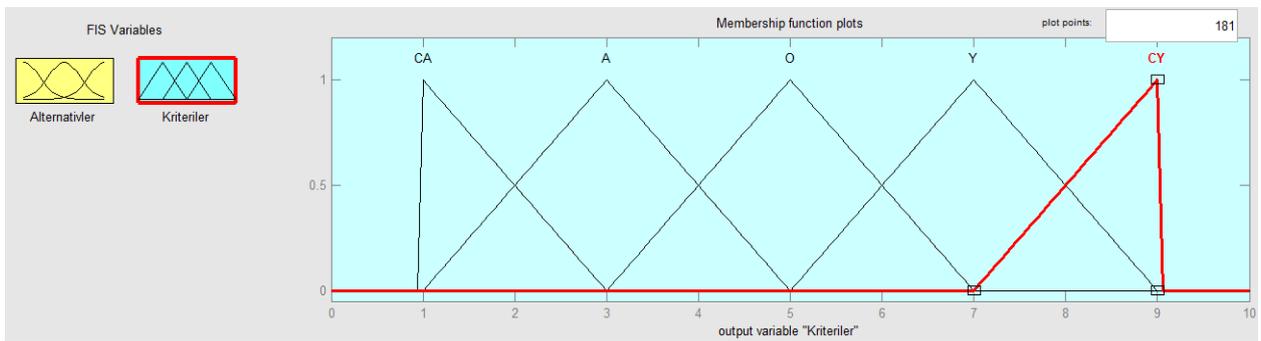


**Şəkil 2** – Üçbucaqlı iki qeyri-səlis  $(\tilde{a}, \tilde{b})$  ədədi və hər hansı həqiqi  $k$  ədədi üçün ədədin kommutativ əməliyyatları

**Figure 2** – Commutative operations of a number for two triangular fuzzy numbers and any real number  $k$



Şəkil 3 – İki ədədin kommutativ əməliyyatı  
Figure 3 – Commutative operation of two numbers



Şəkil 4 – Alternativlər və meyarlar üzrə mənsubiyyət funksiyalarının qrafik təsvirləri [5-8]  
Figure 4 – Graphical representations of membership functions for alternatives and criteria [5-8]

$$\begin{aligned}\tilde{a}(+) \tilde{b} &= \tilde{b}(+) \tilde{a}, & a_1 \geq 0, b_1 \geq 0, k \geq 0 \\ \tilde{a}(\times) \tilde{b} &= \tilde{b}(\times) \tilde{a}, & a_1 \geq 0, b_1 \geq 0, k \geq 0 \\ \tilde{a}(-) \tilde{b} &= \tilde{b}(-) \tilde{a}, & a_1 \geq 0, b_1 \geq 0, k \geq 0 \\ K * \tilde{a} &= \tilde{a} * k, & a_1 \geq 0, b_1 \geq 0, k \geq 0\end{aligned}$$

Matlab mühitində üçbucaq qeyri-səlis ədədlərin mənsubiyyət funksiyalarının qrafik təsvirləri verilib.

**Xəssə 4.**  $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)$  və  $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)$  üçbucaqlı iki qeyri-səlis ədəddir. Qraflar nəzəriyyəsi ilə bağlı metoddan istifadə edərək təpələr arasındakı məsafə aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$\begin{aligned}d(\tilde{a}, \tilde{b}) &= \\ &= \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]}\end{aligned}$$

Bu əməliyyatların isbatı sadədir.

Linqvistik termləri qeyri-səlis ədədlərə çevirmək üçün qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi ilə bağlı çevrilmələrdən istifadə olunur. Bu işdə meyarları və alternativləri qiymətləndirmək üçün 1 ilə 9 arasında dəyişən qiymətləndirmə şkalasından istifadə edəcəyik. Cədvəl 1-də alternativlər üçün istifadə olunan linqvistik dəyişənlər və qeyri-səlis qiymətlər təsvir edilmişdir, Cədvəl 2 isə meyarlar üçün istifadə olunan linqvistik dəyişənlər və qeyri-səlis qiymətlər təsvir edilmişdir [8-10].

Cədvəl 1 – Alternativlər üçün linqvistik termlər  
Table 1 – Linguistic terms for alternatives

Linqvistik termlər	Mənsubiyyət funksiyası
Çox pis (ÇP)	(1,1,3)
Pis (P)	(1,3,5)
Kafi (K)	(3,5,7)
Yaxşı (Y)	(5,7,9)
Çox yaxşı (ÇY)	(7,9,9)

**Cədvəl 2** – Meyarlar üçün linqvistik termlər  
**Table 2** – Linguistic terms for criteria

Linqvistik termlər	Mənsubiyyət funksiyası
Çox aşağı (ÇA)	(1,1,3)
Aşağı (A)	(1,3,5)
Orta (O)	(3,5,7)
Yüksək (Y)	(5,7,9)
Çox yüksək (ÇY)	(7,9,9)

### Nəticə

Bu işdə, qeyri-səlis bir mühitdə idarəetmə sistemlərinin dayanıqlığını qiymətləndirmək üçün çox meyarlı qərar qəbulətmə yanaşmasını təqdim edirik. Təklif olunan yanaşma üç mərhələdən ibarətdir.

Birinci mərhələdə idarəetmə sistemlərinin dayanıqlığını qiymətləndirmək üçün meyarlar müəyyən edilir.

İkinci mərhələdə mütəxəssislər meyarlara və alternativlərə linqvistik qiymətlər verir. Qeyri-səlis TOPSIS, hər alternativin dayanıqlığını ölçmək üçün balları toplamaq və ümumi bir performans hesabı yaratmaq

üçün istifadə olunur. Ən yüksək bal toplayan alternativ, ən yaxşı dayanıqlı idarəetmə sistemi olaraq seçilir və tətbiq edilməsi tövsiyə olunur.

Üçüncü, son mərhələdə qərar qəbulətmə prosesinə alternativlərin təsirini müəyyən etməkdən sonra meyar çəkirlərinin dəqiq təhlil edilir.

Bizim yanaşmamızın üstünlüyü idarəetmə sistemlərinin dayanıqlığını qismən və ya natamam məlumatlarla qiymətləndirmək qabiliyyətidir. Təklif olunan yanaşma dayanıqlı idarəetmə sistemlərinin qiymətləndirilməsində və seçilməsində praktiki olaraq tətbiq edilə bilər. Qərar qəbulətmə prosesi iştirak edənlərin sayından və mövzu sahəsində aparılan təcrübələrdən asılı olduğundan, verilənlər diqqətlə seçilməlidir.

### Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

### REFERENCES

1. **Lütfi Zadə, Rafiq Əliyev.** Fuzzy Logic Theory and Applications, *World Scientific*, 2018, 612 p. (*in English*)
2. Fuzzy control of complex systems. M. Jamshidi. *Soft Computing* 1,42-56 (1997) (*in English*)
3. **Kandel A.** Fuzzy Expert Systems. CRC Press, 2012. Boca Raton, 17-19. (*in English*)
4. **Sugeno M., Kang T., Kang G.** Structure Identification of Fuzzy Model. *Fuzzy Sets and Systems*, 2017, 28, Pp. 15-33. (*in English*)
5. An application of TOPSIS for ranking internet web browsers. Shahram Rostampour. Department of Management Science, Islamic Azad University, Central Branch, Tehran, Iran. 2012, p. 7 (*in English*)
6. **Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of the Operational Research*, 2, 429–44. (*in English*)
7. **Charnes A, Cooper W. W., Lewin, A., Seiford, L. M.** (). Data envelopment analysis: theory, methodology and applications. Massachusetts: *Kluwer Academic Publishers*, 1994, 513 p. (*in English*)
8. **Andersen P., Petersen N.C.** A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis, *Management Science*, 2013. 39, Pp. 1261-1264. (*in English*)
9. **Saaty T.L.** How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 2018, 48, Pp. 9–26. (*in English*)
10. **Məmmədova K.A.** Robotik dinamik sistemlərin riyazi modelləşdirilməsi və simulyasiyası. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 2022, T.14, №4, c. 98-111 (*in Azerbaijani*)

# **Diagnostic Monitoring of Electric Motors Based on Artificial Intelligence Methods**

**F.H. Huseynov**

*Azerbaijan National Aviation Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

## **For correspondence:**

Huseynov Farid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

## **Abstract**

In this article, the possibilities of application of artificial intelligence technology in diagnostics of faults of electric motors are examined. The application of traditional diagnostic monitoring systems in the diagnosis of motors faces problems in determining the normal and threshold values of several diagnostic parameters that cannot be measured in working conditions in cases of lack of certain information. To partially overcome these problems, it is also possible to provide a new hybrid control by applying artificial intelligence-based diagnostic systems together with traditional methods to increase the efficiency and accuracy of diagnostic control in the working condition. In the research work, fault diagnosis schemes using neural networks, fuzzy logic, neural-fuzzy and genetic algorithms were studied, and their advantages and disadvantages compared to traditional diagnostic methods were analyzed. From the conducted studies, we conclude that the methods of artificial intelligence technology have a great potential in the diagnosis of difficult-to-detect faults.

**Keywords:** electric motor; artificial intelligence; fault diagnosis; neural networks; fuzzy logic; neuron-fuzzy; genetic algorithms.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_111\_121

**Received** 22.11.2022

**Revised** 19.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

## **For citation:**

*Huseynov F.H.*

[Diagnostic Monitoring of Electric Motors Based on Artificial Intelligence Methods]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 111-121 (in Azerbaijani)*

## Süni intellekt metodları əsasında elektrik mühərriklərinin diaqnostik monitorinqi

**F.H. Hüseynov**

*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

### Yazışma üçün:

Hüseynov Fərid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

### Xülasə

Məqalədə, süni intellekt metodlarının mühərriklərin nasazlıqlarının diaqnostikasında tətbiqi imkanları nəzərdən keçirilmişdir. Mühərriklərin diaqnostikasında ənənəvi diaqnostik monitorinq sistemlərinin tətbiqi qeyri-müəyyən informasiya çatışmazlığı hallarında, həmçinin, işçi vəziyyətdə ölçülməsi mümkün olmayan bir sıra diaqnostik parametrlərin normal və hədd qiymətlərinin müəyyən olunmasında problemlərlə üzləşir. Bu problemləri qismən aradan qaldırmaq, işçi vəziyyətdə diaqnostik nəzarətin effektivliyini və dəqiqliyini artırmaq üçün ənənəvi metodlarla yanaşı, süni intellekt əsaslı diaqnostika sistemlərinin birlikdə tətbiqi ilə yeni hibrid nəzarəti təmin etmək olar. Tədqiqat işində neyron şəbəkələri, qeyri-səlis məntiq, neyron-qeyri-səlis və genetik alqoritmlərdən istifadə edilən nasazlıq diaqnostikası sxemləri tədqiq olunaraq onların ənənəvi diaqnostik metodlara nisbətən üstünlükləri və mənfə cəhətləri müqayisə edilərək təhlil olunmuşdur. Aparılmış tədqiqatlardan belə qənaətə gəlirik ki, süni intellekt metodları çətin aşkarlanan nasazlıqların diaqnostikasında böyük potensiala malikdir.

**Açar sözlər:** elektrik mühərriki; süni intellekt, nasazlıqların diaqnostikası; neyron şəbəkələri; qeyri-səlis məntiq; neyron-qeyri-səlis; genetik alqoritmlər.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_111\_121

УДК 321.313

## Диагностический мониторинг электродвигателей на основе методов искусственного интеллекта

**Ф.Х. Гусейнов**

*Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

### Для переписки:

Гусейнов Фарид / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

### Аннотация

В статье рассмотрены возможности применения технологии мягких вычислений в диагностике неисправностей электродвигателей. Применение традиционных систем диагностического мониторинга при диагностике двигателей сталкивается с проблемами определения нормальных и пороговых значений ряда диагностических параметров, которые не могут быть измерены в рабочих условиях в случаях отсутствия определенной информации. Для частичного преодоления этих проблем также можно обеспечить новый гибридный контроль путем применения систем диагностики на основе искусственного интеллекта совместно с традиционными методами с целью повышения эффективности и точности диагностического контроля в рабочем состоянии. В работе изучены схемы диагностики неисправностей с использованием нейронных сетей, нечеткой логики, нейро-нечетких и генетических алгоритмов и проанализированы их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами диагностики. Исследования приводят к выводу, что методы технологии мягких вычислений имеют большой потенциал в диагностике труднообнаруживаемых неисправностей.

**Ключевые слова:** электродвигатель, мягкие вычисления, диагностика неисправностей, нейронные сети, нечеткая логика, нейрон-нечеткий, генетические алгоритмы.

## Giriş

Dəyişən və sabit cərəyan mühərrikləri nəqliyyatda və sənayenin müxtəlif sahələrində intensiv şəkildə istismar olunur. Dəyişən iş mühiti və dinamik yüklənmə həmişə mühərriklərin stator dolaqlarında sarğılararası qısaqapanmalara, yastıqların sıradan çıxmasına, rotor çubuqlarında zədələnmələrə və s. kimi böyük nasazlıqlara səbəb olur. Belə nasazlıqlar düzgün aşkar edilmədikdə və vaxtında aradan qaldırılmadıqda mühərrikin dayanması ilə nəticələnir. Nasazlıqların erkən mərhələdə diaqnostikası mühərrikin etibarlılığının artırılmasına gətirib çıxarır. Bununla birgə, nasazlıqların təyini üçün qabaqcıl aşkarlama metodlarını tətbiq etməklə texniki xidmət xərclərinə qənaət edilir. Elmi tədqiqat işlərinin təhlillərinin nəticələri göstərir ki, elektrik mühərriklərinin monitorinqi, nasazlıqların diaqnostikası və aşkarlanması elektrik mühəndisliyi sahəsində çox vacib və mürəkkəb tədqiqat sahəsidir.

Süni intellekt qeyri-müəyyənlik və qeyri-dəqiqlik şəraitində insan şüurunun yüksək səviyyədə düşünmək və öyrənmək qabiliyyətinə paralel olan intellektual hesablamaların yeni bir yanaşmasıdır. Yalnız dəqiqlik, əminlik və konkretliklə məşğul olan çətin hesablama metodlarından fərqli olaraq, real dünya problemlərinə qeyri-dəqiq və ya qeyri-adekvat, lakin iqtisadi və rəqabətli həllərin əldə edilməsində effektivdir.

Bildiyimiz kimi, praktiki operatorlardan alınan keyfiyyətli məlumatlar mühərrik nasazlığının erkən mərhələdə dəqiq və etibarlı diaqnostikasında mühüm rol oynaya bilər. Beləliklə, bu sahəyə süni intellekt metodlarının tətbiqi əhəmiyyətli diaqnostika metodları ilə müqayisədə daha tez uyğunlaşma, rahatlıq, çeviklik və daxil edilmiş linqvistik biliklərin unikal xüsusiyyətlərini təmin edə bilər [1-3].

## Mühərrik nasazlıqlarının əhəmiyyətli diaqnostika üsulları

Elektrik mühərriklərinin nasazlıqlarının aşkarlanması və diaqnostikası üçün çoxsaylı əhəmiyyətli yanaşmalar mövcuddur. Ən sadə üsul birbaşa yoxlamadır. Klassik parametrlərin qiymətləndirilməsi üsulları mühərrik nasazlıqlarının aşkarlanması və diaqnostikası üçün də əsaslı şəkildə tətbiq olunur. Burada faktiki mühərrikdən gələn bəzi ölçmə siqnallarına əsaslanaraq, mühərrikin iş vəziyyəti ilə bağlı müvafiq məlumatları analiz etmək üçün parametrlərin təyini üsullarından istifadə edilir. Şəkil 1-də belə nasazlığın aşkarlanması prosesi göstərilmişdir.

Parametrlərin qiymətləndirilməsi metodu real vaxt halları üçün çox uyğundur. Lakin, qeyd edilən metod mühərrikin iş prinsipini dərinləndirən başa düşməyi və dəqiq riyazi modeli tələb edir.



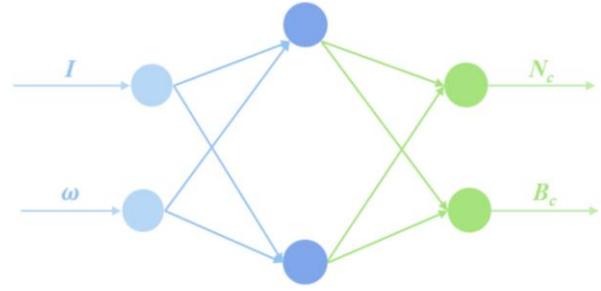
Şəkil 1 – Parametrlərin qiymətləndirilməsi əsasında mühərrik nasazlığının diaqnostikası  
Figure 1 – Diagnosis of motor failure based on parameter evaluation

Bundan əlavə, mühərrik qocaldıqca alınmış məlumatların dəqiqliyi azalır. Son bir neçə il ərzində ənənəvi diaqnostika metodlarının üzləşdiyi qeyd olunan çətinlikləri aradan qaldırmaq üçün süni intellekt metodlarından istifadə edilir. Süni intellekt texnologiyaları üç əsas hissədən ibarətdir: neyron şəbəkələr, qeyri-səlis məntiq və genetik alqoritmlər [1, 3-6]. Neyron şəbəkələrin, qeyri-səlis məntiqin, genetik alqoritmlərin və onların uyğun kombinasiyası (birləşməsi) ilə mühərriklərin nasazlığının daha dərinə aşkarlanması və diaqnozu üçün hibrid sistemlər tətbiq edilə bilər.

### Neyron şəbəkələr əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası

Qeyri-xətti funksiyaların güclü aproksimasiyası və adaptiv öyrənmə imkanlarına görə neyron şəbəkələr mühərriklərin nasazlıqlarının diaqnostikası sahəsində böyük maraq doğurur. Bəzi tədqiqatçılar neyron şəbəkələr əsasında nasazlıqların aşkarlanması üçün müxtəlif sxemlərin hərtərəfli tədqiqini aparmışlar. Onlar şəkil 2-də göstəriləyi kimi, mühərrikdə yaranan nasazlıqların diaqnostikası üçün neyron əks-yayıma şəbəkəsinin - BP (Back-propagation) tipik strukturunu təklif etmişlər. Burada yaranan nasazlıqlara, sarğıların burumları arasındakı izolyasiya və yastıqların texniki vəziyyəti aiddir [3-7].

Burada  $I$  statorun cərəyanı,  $\omega$  rotorun sürəti,  $N_c$  və  $B_c$  isə uyğun olaraq mühərrik sarğılarının izolyasiyası və yastıqların vəziyyətini xarakterizə edən kəmiyyətlərdir. Mühərrikin xarakterik tənzimləmələrindən bilirək ki, girişlər ( $I$ ,  $\omega$ ) və çıxışlar ( $N_c$ ,  $B_c$ ) arasındakı əlaqə qeyri-xəttidir. Bu əlaqəni formalaşdırmaq üçün BP neyron şəbəkəsi tətbiq olunur. Struktur şəkil 3-də göstərilmişdir.



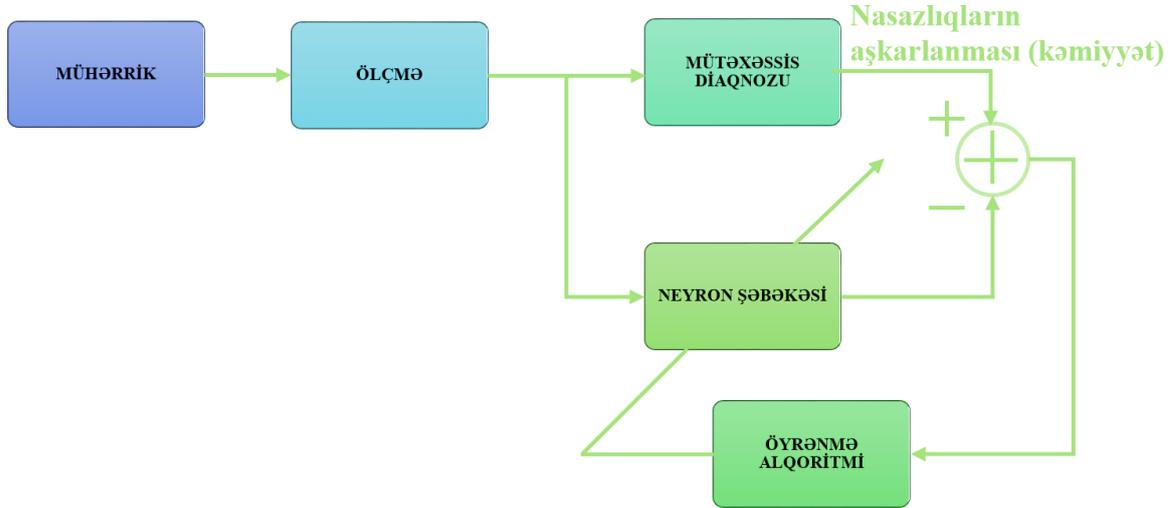
Şəkil 2 – Başlanğıc xətlərin aşkarlanması üçün BP neyron şəbəkəsi

Figure 2 – BP neural network for initial fault detection

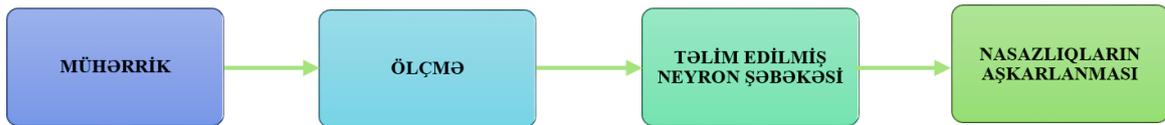
$I$  və  $\omega$  qiymətləri onlayn ölçmə məlumatlarından asanlıqla əldə edilə bilər. Əslində, şəkil 2-dəki BP neyron şəbəkəsinin giriş parametrlərinin sayını artırmaqla (məsələn  $I_2$  və  $\omega_2$ ) dəqiqliyi artırmaq olar. Digər tərəfdən  $N_c$  və  $B_c$  şəkil 3-də göstəriləyi kimi ekspert tərəfindən qiymətləndirilməlidir. Mühərrikin vəziyyətinin monitorinqi və qüsurlarının diaqnostikası üçün mühərriki kəmiyyətə təsvir edən  $N_c$  və  $B_c$  qiymətləri üç vəziyyət səviyyəsinə (yaxşı, qənaətbəxş, pis) əsasən təsnif edilir. Neyron şəbəkə ekspertdən diaqnostika təcrübəsini öyrənmək üçün təlim keçdikdən sonra, şəkil 4-də göstəriləyi kimi, onlayn rejimdə istifadə olunur.

Mühərrikin vəziyyətindən, stator cərəyanından və rotorun fırlanma sürətindən asılı olaraq, neyron şəbəkə yuxarıda göstərilən üç nasazlıq səviyyəsinə uyğun olaraq başlanğıc nasazlıqları göstərə bilər.

Eyni zamanda digər tədqiqatçılar da sınıq rotor çubuqlarının sayını aşkar etmək üçün oxşar BP neyron şəbəkəsinə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostikası sxemini təklif etmişdir. Neyron şəbəkəsi üçün təlim məlumatları saz, eləcə də simulyasiya edilmiş nasaz maşınlardan əldə edilir. Onların təklif etdiyi perspektivli sxem simulyasiyalarda 100% diaqnostika dəqiqliyinə malikdir.



Şəkil 3 – Neyron şəbəkəyə əsaslanan mühərrik nasazlığının aşkarlanması üçün öyrənmə mərhələsi  
Figure 3 – A learning phase for neural network-based motor fault detection



Şəkil 4 – Neyron şəbəkə əsasında mühərrik nasazlıqlarının aşkar edilməsi  
Figure 4 – Motor fault detection based on neural network

BP neyron şəbəkə ilə yanaşı mühərriklərin diaqnostikası üçün digər bir neyron şəbəkə növü olan SOM – özünü təşkildən xəritə (self-organizing map) istifadə olunur.

Məlumdur ki, stator gərginliyinin qeyri-simmetrikliliyi, dişli ötürmələrdə və rotor çubuqlarında qırılmaların yaranması, stator dolğında qısa-qapanma və s. kimi müxtəlif nasazlıqlar eyni vaxtda baş verə bilər. BP neyron şəbəkəsindən fərqli olaraq SOM əsaslı yanaşma heç bir nəzarət olmadan nasazlıqların təsnifatını öyrənmək və yaratmaq kimi praktiki üstünlüyə malikdir. Buna görə də, mühərrik nasazlıqlarının avtomatlaşdırılmış diaqnostikası sistemlərinin qurulmasında SOM-dan istifadə etmək daha faydalı ola bilər [7-11, 12].

SOM əsaslı motor nasazlığının diaqnostikası sxemini qısaca aşağıdakı kimi təsvir etmək olar. Birincisi, tipik bir SOM şəbəkəsi

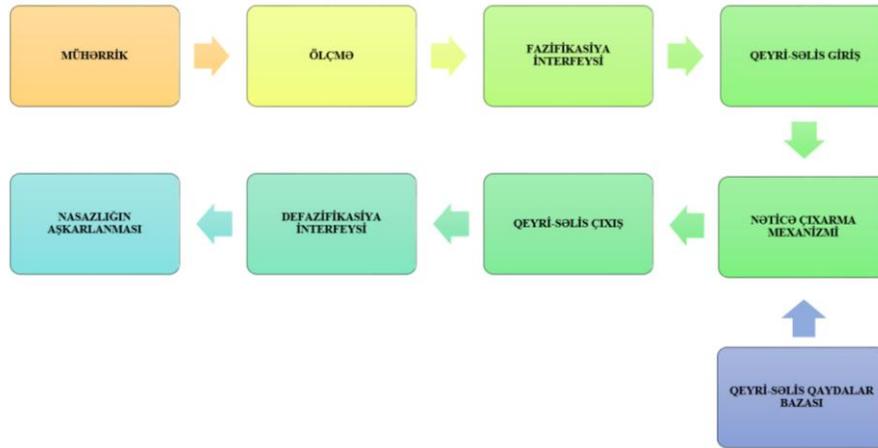
yalnız normal şəraitdə işləyən mühərriklərdən alınan məlumatlarla öyrənilir. Sonra, öyrənilmiş SOM aşkar edilməmiş ölçmə məlumatlarından istifadə etməklə sınaqdan keçirilir. Objekt xəritələşdirməsindəki xüsusiyyət qruplarına əsasən, məlumatlar mümkün nasazlıq kateqoriyasına və normal SOM məlumatlarına görə təsnif ediləcəkdir. Ekspert daha sonra real nasazlıq məlumatlarını müəyyən edə və sonradan SOM-u yenidən öyrətmək üçün bu məlumatları istifadə edə bilər. Bu yolla, ekspertin nəzarəti altında təklif olunan metod öyrənmə üçün heç bir məlumatın mövcud olmadığı nasazlıq diaqnostikası işlərini yerinə yetirə bilər. Bu metodlar yastıqlarda yaranan nasazlıqları aşkar etmək üçün fırlanan maşında tədqiq edilmişdir. Simulyasiyalar göstərmişdir ki, giriş signalının nisbətən kiçik diapazonu zamanı SOM nasazlıqları düzgün aşkarlaya bi-

lır, BP neyron şəbəkəsi isə uğursuz olur [3-5, 7,8]. Beləliklə, mühərrik nasazlığının diaqnostikası üçün neyron şəbəkələrdən istifadənin üstünlüyü onların öz-özünə uyğunlaşması və xətalara göstəricisi ilə mövcud ölçmə signalı arasında əlaqə qura bilən qeyri-xətti yaxınlaşma qabiliyyətləri ilə bağlıdır. Həmçinin, öyrənmə proseduru insan ekspertləri tərəfindən idarə olunur. Neyron şəbəkələrə əsaslanan nasazlıq diaqnozu ümumi məqsədli həlldir. Mühərrik diaqnostikası modeli haqqında əvvəlcədən məlumat tələb olunmur. Yalnız təlim məlumatları əvvəlcədən alınmalıdır. Bununla belə, neyron şəbəkələrə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostikasının kritik çatışmazlığı ondan ibarətdir ki, mühərriklərin operatorundan gələn keyfiyyətli və linqvistik məlumat onların ədədi yönümlü qara qutu strukturlarına

görə birbaşa istifadə edilə və ya neyron şəbəkələrə daxil edilə bilməz.

### Mühərrik nasazlıqlarının qeyri-səlis məntiqlə diaqnostikası

Nasazlıqların linqvistik dəyişənlər əsasında diaqnostikası biliklərindən faydalanmaq üçün qeyri-səlis məntiqdən istifadə edən çoxsaylı mühərrik nasazlığının diaqnostikası üsulları tədqiq edilmişdir. Bir sıra tədqiqatçılar mühərrik diaqnostikasında qeyri-səlis məntiq istifadə etmişlər. Qeyri-səlis məntiqə əsaslanan strukturun tərkib hissəsi fəzafikasiya (qeyri-səlisləşdirmə) interfeysi, nəticə çıxarma mexanizmi, qeyri-səlis qaydalar bazası və defəzafikasiya bloklarıdır. Qeyri-səlis diaqnostik nəzarət sisteminin strukturu şəkil 5-də göstərilmişdir.



Şəkil 5 – Qeyri-səlis məntiq əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası  
Figure 5 – Motor fault diagnosis based on fuzzy logic

Burada iki nasazlıq nəzərə alınır: stator gərginliyinin qeyri-simmetrikliliyi və açıq faza. Diaqnoz proseduru stator cərəyanlarının amplitud xüsusiyyətlərinin təhlili əsasında həyata keçirilir. Qeyri-səlis nasazlıq diaqnostikası sisteminə giriş kimi üç stator cərəyanı amplitudu  $I_a$ ,  $I_b$  və  $I_c$  seçilir. Bu girişlərə dörd qeyri-səlis üçbucaqlı və ya trapesoidal mənsubiyyət funksiyası yəni “çox kiçik”, “kiçik”, “orta” və “böyük” təyin

edilmişdir. Stator şərtləri üç düzbucaqlı mənsubiyyət funksiyası ilə ifadə olunur yəni yaxşı, zədələnmiş və ciddi şəkildə zədələnmiş. Ümumilikdə, yuxarıda qeyd olunan iki nasazlığı aşkar etmək üçün tətbiq edilən 12 evristik IF-THEN qeyri-səlis nəticə çıxarma qaydaları mövcuddur.

1. ƏGƏR  $I_c$  ortadırsa, onda stator yaxşı vəziyyətdədir;

2.  $I_b$  kiçikdirsə, ONDA stator zədələnib.

Ümumiyyətlə, belə qeyri-səlis qaydaların iki əsas mənbəyi vardır. Birinci evristik yanaşma mühərrik operatorlarından əldə edilən linqvistik təcrübəyə əsaslanır. Digər üsul saz və nasaz mühərriklərin ölçmə siqnallarından qeyri-səlis nasazlıq diaqnozu qaydalarını əldə etmək üçün bəzi özünü təşkil edən alqoritmlərdən istifadə etməkdir. Sxem kompüter simulyasiyalarında eksperimental məlumatlarla yoxlanılır ki, bu da onun nasazlıqların diaqnostikasında mühüm rol oynadığını göstərir. Nümunə üçün asinxron mühərrikdə qeyri-səlis məntiqdən istifadə edərək sınımış rotor çubuğu diaqnostika sistemini təsvir edək. Bu sistemdə təkcə nasazlığın baş verməsi deyil, həm də qırılan çubuqların sayı da aşkar edilə bilər.

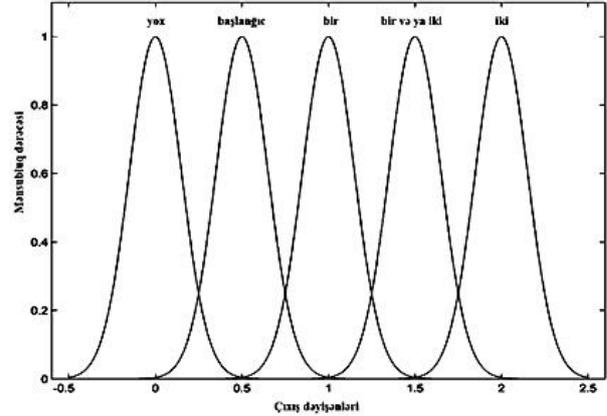
Məlumdur ki, rotor çubuqlarının qırılması nəticəsində yaranan rotor asimetriyası olan mühərrikdə harmoniklərin spektr xətləri  $(1 \pm 2s) f_1$  - də mövcuddur. Burada  $s$  - sürüşmə və  $f_1$  - statorun tezliyidir. Bu iki tezlikdə harmonik komponentlərin amplitudları  $A_1$  və  $A_2$  ilə işarələnir. Sınıq çubuq nasazlığı, bu iki dəyişən əsasında aşkar edilə bilər. Əvvəlcədən müəyyən edilmiş böyük və kiçik qeyri-səlis terminlər olduqda istifadə edilən tipik qeyri-səlis qayda aşağıdakı kimidir:

- ƏGƏR  $A_1$  böyük və  $A_2$  kiçikdirsə;
- ONDA bir qırıq çubuq vardır.

Qeyd edək ki, bir qırıq çubuq kimi yaranmış nasazlıqlar neyron şəbəkəsinə əsaslanan nasazlığın diaqnostika metodlarında olduğu kimi ədədi qiymətlər əvəzinə qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaları ilə təsvir olunur. Onlar şəkil 6-da göstərilmişdir.

Digər nümunədə qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrikin yastıq nasazlığının diaqnostikası sxemi qeyd edilmişdir. Prinsip qeyri-səlis əsaslandırma qaydalarından istifadə

edərək aparıcı vibrasiya siqnalının tezlik spektrini təhlil etməkdir.



Şəkil 6 – Sınıq çubuq nasazlıqları üçün mənsubiyyət funksiyaları (yox - sınıq çubuq yoxdur; başlangıç - başlangıç xəta; bir - bir sınıq çubuq; bir və ya iki - bir və ya iki sınıq çubuq; iki - iki sınıq çubuq)

Figure 6 – Correlation functions for broken rod faults (no - no broken rod; start - starting fault; one - one broken rod; one or two - one or two broken rods; two - two broken rods)

Bildiyimiz kimi, yastıqların işçi vəziyyəti onun vibrasiya siqnallarında birbaşa əks olunur. Burada  $\{x_{loose}, x_{damage}, x_{time}\}$  həm zaman, həm də elektrik şəbəkəsində daşıyıcı xarakteristik siqnalların amplitudlarını ifadə edir. Ümumilikdə, yastıqların zədələnməsini və digər nasazlıqları aşkar etmək üçün onların sxemində səkkiz qeyri-səlis diaqnoz qaydaları tətbiq olunur. Aşağıdakı iki təmsil qaydası təsvir edilmişdir.

1. ƏGƏR  $x_{loose}$  yüksəkdirsə və  $x_{time}$  orta və ya yüksəkdirsə, ONDA yastıq nasazlığı var.

2. ƏGƏR  $x_{damage}$  yüksək və  $x_{time}$  ortadırsa, ONDA yastığın zədələnmə səviyyəsi yüksəkdir.

Bu diaqnostika yanaşması yastığın “ağır” şərtlərinin aşkar edilməsində 91,7% dəqiqliyə və yastığın “yaxşı” və “pis” vəziyyətlərində 100% dəqiqliyə nail olur [4, 10].

Qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostika üsulları daxili

lingvistik biliklərin və təxmini düşünmə qabiliyyətinin üstünlüklərinə malikdir. Lakin, belə bir sistemin konfigurasiyası praktiki operatorlardan əldə edilən intuitiv təcrübədən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır.

Qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaların və qeyri-səlis qaydaların heç bir mənada optimal olmasına zəmanət vermək olmaz. Bundan başqa, qeyri-səlis məntiq sistemləri real vaxt rejimində nasazlıqların diaqnostikasının mürəkkəb sistemlərində öz-özünə öyrənmə qabiliyyətinə malik deyil. Yuxarıda göstərilən iki çatışmazlıq təklif edilən metod vasitəsilə neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiqin “neyron-qeyri-səlis” (hibrid) birləşməsi ilə qismən aradan qaldırıla bilər.

### **Neyron-qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası**

Bildiyimiz kimi, həm neyron şəbəkələrin, həm də qeyri-səlis məntiqin özünəməxsus üstünlükləri və mənfi cəhətləri var. BP-nin neyron şəbəkəsinin əsas çatışmazlığı onun qara qutu məlumatlarının emal strukturu və konvergenziyanın aşağı sürətidir. Digər tərəfdən, qeyri-səlis məntiq insan beyninə bənzər bir nəticə çıxarma mexanizminə malikdir, lakin onun effektiv öyrənmə qabiliyyəti yoxdur. Qeyri-səlis mənsubiyyət qaydalarının və funksiyalarının avtomatik sazlanması klassik qeyri-səlis məntiq sistemində çətin ola bilər. Bir sözlə, neyron şəbəkələri modellər olmadan ədədi yanaşmalar kimi nəzərdən keçirilir və qeyri-səlis məntiq yalnız lingvistik səviyyədə qaydalar və nəticə çıxarmaqla məşğul olur. Buna görə də, neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiqin bir hibrid “neyron-qeyri-səlis” sistemdə birləşdirməklə onların hər ikisinin həm fərdi çatışmazlıqlarını aradan qaldıra,

həm də bir-birinin üstünlüklərindən daha yaxşı nəticələr əldə olunmasına nail ola bilərik. Əslində, neyron-qeyri-səlis metod əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikası sahəsində bir çox perspektivli nəticələr əldə etmişdir [3, 5, 6, 11].

Bəzi tədqiqatçılar tərəfindən qeyri-səlis şəbəkə sistemi (ANFIS-adaptive network-based fuzzy inference system) əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası sxemi araşdırılmışdır. Əslində, ANFIS beş səviyyəli birbaşa rabitə şəbəkəsinin arxitekturasına malik qeyri-səlis məntiqli nəticə çıxarma sisteminin tətbiqidir.

ANFIS-in strukturu və öyrənmə alqoritmi haqqında ətraflı müzakirələrə gələcək tədqiqat işlərində yer ayrılacaqdır. Burada araşdırılan diaqnostika problemi yuxarıda müzakirə edilən kimidir. Giriş və çıxış qiymətlərinin seçilməsi də oxşardır. Lakin, məsələn, ANFIS-də Mamdani tipli qeyri-səlis qaydalar yerinə Sugeno tipli doqquz qeyri-səlis qayda istifadə olunur:

- ƏGƏR  $A1$  böyük və  $A2$  kiçikdirsə;
- ONDA  $f = pA1 + qA2 + r$ .

burada  $f$  - cari qeyri-səlis qaydanın çıxışı,  $p$ ,  $q$  və  $r$  isə ANFIS öyrənmə alqoritmi ilə tənzimlənə bilən uyğunlaşma parametrləridir. Son diaqnoz həllini göstərən rəqəmli çıxış məlumatları, yəni rotorun qırılmış çubuqlarının sayı bu doqquz qaydaların ayrı-ayrı çıxış məlumatlarından hesablanır. Tədqiqatlar göstərir ki, ANFIS əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üsulu xalis qeyri-səlis məntiq sistemi kimi ekvivalent diaqnostik performansını təmin edə bilər. Bununla belə, ANFIS-də qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaları və qeyri-səlis qaydalar sınaq və səhv yolu ilə deyil, təlim məlumatlarından "avtomatik" əldə edilir. Digərləri qeyri-səlis neyron şəbəkəsinin (FALCON - fuzzy adaptive learning control / deci-

sion network) üç fazalı asinxron mühərrikdə sürtünmə nasazlıqlarının aşkarlanması metoduna əsasən müzakirə etmişlər. Onların sxemi müxtəlif yük momenti hallarında diaqnostika/aşkarlamayı təmin edə bilər. İstənilən diaqnostika nəticələrinə əlavə olaraq, təlim keçmiş FALCON-dan qeyri-səlis If-THEN qaydaları baxımından müvafiq evristik biliklər əldə edilə bilər. Əslində, qaydaların alınması qeyri-səlis neyron şəbəkələrin fərqli xüsusiyyətlərindən biridir. FALCON və ANFIS arasında da müqayisə aparılmış və ANFIS-dən istifadə etməklə əldə edilən diaqnoz/ aşkarlamaların FALCON-dan daha dəqiq olduğu göstərilmişdir. Bundan əlavə, ANFIS ilə nasazlığın aşkarlanmasının yaxınlaşma sürəti FALCON ilə müqayisədə daha sürətlidir. Lakin, ANFIS-də diaqnostik biliklərin çıxarılması FALCON-da olduğu kimi asan deyil. Sonda qeyd etmək lazımdır ki, qeyri-səlis neyron şəbəkələri həm neyron şəbəkələrindən, həm də qeyri-səlis məntiqdən daha yaxşı mühərrik nasazlıqlarının aşkar edilməsinin məhsuldarlığını təmin edə bilər və neyron-qeyri-səlis əsaslı nasazlıqların diaqnostikası üçün ideal üsulun FALCON-nun qeyri-səlis qaydalarının yüksək sürətli öyrənmə ilə çıxarılması imkanlarını birləşdirməsi gözlənilir.

Qeyri-səlis neyron şəbəkələri həm neyron şəbəkələrin, həm də qeyri-səlis məntiqin üstünlüklərinə malik olmasına baxmayaraq, ANFIS kimi mövcud modellərin əksəriyyəti qeyri-səlis giriş/çıxış məlumatlarını birbaşa idarə edə bilməz. Digər tədqiqatçılar bu çatışmazlığı aradan qaldırmaq üçün qeyri-səlis çıxış məlumatlarını sadə şəkildə idarə etmək üçün modifikasiya olunmuş ANFIS təklif etdi. Nasazlıqların diaqnostikasının bu sxemi heç bir məlumat çevrilmədən birbaşa ekspertlərdən biliklərin əldə edilməsi ilə səciyyələnir.

## Genetik alqoritmlər əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikası

Genetik alqoritmlər (GA), törəmələri olmadan stoxastik optimallaşdırma üsuludur. Onun oriyentasiyası təbii seçimdən, eləcə də təkamül prosesindən götürülmüş ideyalardan irəli gəlir. Kompleks problemlərin universal həlli olaraq, paralel axtarış və optimallaşdırmanın unikal funksiyalarına malikdir. GA çox vaxt məqsəd funksiyalarının törəmələrini tələb edən adi optimallaşdırma sxemlərinə nisbətən həll ediləcək problemlər haqqında daha az ilkin məlumatla ehtiyac duyur [2, 7-12].

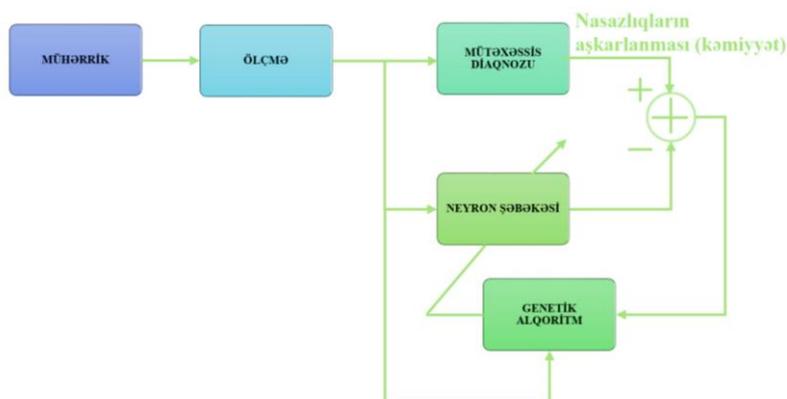
Beləliklə, təkcə BP öyrənmə alqoritmindən istifadə etmək əvəzinə, neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiq sistemlərinin parametrlərini və strukturlarını optimallaşdırmaq üçün GA-dan istifadə etmək məqsədəuyğundur. Prinsipcə, yuxarıda nəzərdən keçirilmiş bütün mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası metodlarının öyrədilməsi (həm yumşaq hesablamalara əsaslanan, həm də ənənəvi həllər daxil olmaqla) GA-lardan istifadə etməklə həyata keçirilə bilər. Neyron şəbəkəsinə əsaslanan mühərriki nasazlığın diaqnostikası sxemini optimallaşdırmaq üçün GA-dan istifadənin blok sxemi şəkil 7-də göstərilmişdir.

Əslində, neyron şəbəkənin müəyyənləşdirilməsi və öyrədilməsi üçün iki GA tətbiqi olunur: “designer” GA və “trainer” GA. Daha ətraflı desək, neyron şəbəkənin dizayn parametrləri, yəni gizli təbəqələrin sayı və ölçüsü, həmçinin neyron ötürmə funksiyasının xüsusiyyətləri GA dizayneri tərəfindən optimallaşdırılır. Bu iki parametrin konfigurasiya prosedurunda tətbiqi neyron şəbəkənin optimal strukturuna və mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üçün parametrlərə gətirib çıxarır.

GA hesablaması TMS320C40 DSP çipindən həyata keçirilir ki, bu da diaqnozun cavab müddətini 300 saniyədən az bir müddətdə

göstərir. Diaqnostikanın effektivliyi bir nasazlığın düzgün aşkarlanmasında faizi 98% - dən çoxdur. Bundan əlavə, o həm də baxılan işlə-

rin təxminən 66%-də hər iki nasazlığın düzgün diaqnostikası ilə və halların təxminən 100%-də ən azı bir nasazlığın öhdəsindən gələ bilər.



Şəkil 7 – Neyron şəbəkələri əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikasında GA-nın tətbiqi  
Figure 7 – Application of GA in motor fault diagnosis based on neural networks

Digər tədqiqatçılar isə Elman neyron şəbəkəsindən istifadə edərək mühərrikin nasazlığının aşkarlanması sxemini təklif etdi. BP-nin neyron şəbəkəsindən fərqli olaraq, Elman neyron şəbəkəsi yaddaş qovşaqları və yerli cari birləşmələr sayəsində zaman sıralarını proqnozlaşdırmaq üçün güclü bir qabiliyyətə malikdir. Nasazlıqlar proqnoz xətası gözləntilərinə nəzərəcarpacaq dəyişikliklər nəticəsində aşkar edilir. Daha sonra, proqnozlaşdırma dəqiqliyini artırmaq və beləliklə daha yaxşı nasazlıq aşkarlama performansına nail olmaq məqsədi ilə Elman neyron şəbəkəsi daxilində kontekst qovşaqlarının ilkin çıxış məlumatlarını optimallaşdırmaq üçün GA əsaslı təlim strategiyası tətbiq edilir. Bu metodun effektivliyini yoxlamaq üçün dişli ötürmə (reduktor) mexanizmində süni nasazlıq yaradılaraq kompüter simulyasiyaları aparılır. Nasazlıqların aşkarlanmasının dəqiq nəticələri model haqqında hər hansı ilkin məlumat olmadan əldə edilmişdir. GA köməkçi optimallaşdırma üsulu olduğundan, praktikada müstəqil şəkildə tətbiq edilə bilməz. GA-nın digər mühərrik nasazlığının diaqnostika sxemləri ilə birləşməsi

daha təkmilləşdirilmiş yeni nəzarət sistemlərini yaratdı. Lakin, GA ilə optimallaşdırma tez-tez böyük hesablamalar tələb edir və buna görə də olduqca çox vaxt alır.

Real vaxt rejimində nasazlıqların diaqnostikasına yönəldilmiş, yaxınlaşma sürətini yaxşılaşdırmaq üçün paralel icra ilə sürətli GA-lar hazırlanmalıdır.

## Nəticə

Məqalədə süni intellekt metodlarına əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostika sistemlərinin son inkişaf texnologiyasını tədqiq olunmuşdur. Neyron şəbəkələri, qeyri-səlis məntiq, neyro-qeyri-səlis və genetik alqoritmlər əsasında mühərrik nasazlığının ən müasir və qeyri-müəyyən informasiya çatışmazlığı hallarında diaqnostikanın mümkünlüyü araşdırılmışdır. Qeyd olunan süni intellekt metodlarının müqayisəli təhlili aparılaraq üstünlükləri və çatışmazlıqları təhlil edilmişdir. Aparılan tədqiqat işinə əsaslanaraq belə qənaətə gəlik ki, süni intellekt metodları mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üçün kompleks problemlərin həllində ən perspektivli metod kimi isti-

fadə edilə bilər. Ənənəvi və süni intellekt metodlarının kombinasiyası ilə gələcəkdə daha dəqiq və etibarlı hibrid diaqnostik monitoring sistemlərinin yaradılması və xüsusilə nəqliyyatda istismar olunan elektrik mühərriklərində tətbiqi bu sahədə böyük uğur hesab oluna bilər. Bu məqalə elektrik mühərriklərində süni intellekt metodları əsasında nasazlıqların diaq-

nostikası sahəsində gələcək tədqiqat fəaliyyətlərimiz üçün başlanğıc nöqtəsidir.

### Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

### REFERENCES

1. **Yusifbəyli N.A., Quliyev H.B., Qasimov R.A.** Paylayıcı elektrik şəbəkələrində reaktiv güc axınlarının qeyri-səlis məntiq nəzəriyyəsi əsasında idarə olunma effektivliyinin artırılması. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, Cild 8. № 2, 2016, s. 96-105. (in Azerbaijan)
2. **Rahmanov N.R., Kurbackij V.G., Yusifbejli N.A., Guliev G.B., Tomin N.V.** Primenenie algoritmov i modelej mashinnogo obucheniya v zadachah upravleniya rezhimami sovremennyh energosistem // ADNSU, Azərb. *Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri*, Cild 21, 2019, №2, s.61-72. (in Russian)
3. **Huseynov F.H., Manafov E.K.** Application of artificial intelligence technology in diagnostics of electric motor failures // Материалы VII Международной научно-практической молодежной конференции «Февральские чтения 2022: Творческий потенциал молодежи в решении авиакосмических проблем» Баку, Национальная Академия Авиации, 2-4 февраля 2022 г, с.94-96. (in English)
4. **M.Muruganandam and M.Madheswaran.** Modeling and Simulation of Modified Fuzzy Logic Controller for Various types of DC motor Drives” IEEE international conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation -2009, 4th-6th June 2009. (in English)
5. **Young Im Cho.** “Development of a new Neuro-Fuzzy hybrid system” Industrial Electronics Society, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE Volume 3, 2-6 Nov. 2004 Page(s):3184 - 3189 Vol. 3 Digital Object Identifiers 10.1109/IECON 2004 .1432322. (in English)
6. **S. K. Pradhan, D. R. Parhi and A. K. Panda.** “Neuro-fuzzy technique for navigation of multiple mobile robots” Springer Science + Business Media, Fuzzy Optim Decis Making, 2006, pp.255–288. (in English)
7. **M. Ali Akcayol.** “Application of adaptive neuro-fuzzy controller for SRM” An International Journal of Advances in Engineering Software, Elsevier, 2004. pp. 129–137. (in English)
8. **Lee J., Abujamra R, Jardine A. K. S, Lin D, Banjevic. D.** An integrated platform for diagnostics, prognostics and maintenance optimization. The IMS 2004 International Conference on Advances in Maintenance and in Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradations, Arles, France; 2004. (in English)
9. **E. Ritchie et al.** “Diagnosis of rotor faults in squirrel cage induction motors using a fuzzy logic approach,” Proceedings of the 1994 International Conference on Electrical Machines, Paris (France), vol. 2, pp. 348-352. (in English)
10. **X.Z. Gao, S.J. Ovaska, Y. Dote.** Motor fault detection using Elman neural network with genetic algorithm-aided training, in: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 2000, Nashville, TN, pp. 2386–2392. (in English)
11. **F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas.** A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnostics based on stator current monitoring, in: Proceedings of Stockholm Powertek, June 1995, Stockholm, Sweden, pp. 150–161. (in English)
12. **F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas.** Integrated condition monitoring and diagnosis of electrical machines using minimum configuration artificial intelligence, in: Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, September 1997, Trondheim, Norway, pp. 2983–2988. (in English)

## **Application of Express Methods for the Detection of Explosive Substances**

**K.A. Askerov, S.T. Ahmadova**

*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

### **For citation**

Ahmadova Saida / e-mail: saidaahmedovabaku@gmail.com

### **Abstract**

The article studies the main types of explosives, identification tools, and theoretical knowledge about the main properties and parts of explosives. Also, the application characteristics of express methods for detecting explosive substances are defined. It is shown that a new format approach and modern new technologies are one of the most important directions in the determination of explosives. Adaptation of the technical means used in the detection of explosives to international standards is investigated. The devices used to identify explosives and their characteristics are analyzed.

**Keywords:** explosive substance, express test, reagent, analytical research, detector, trace of explosive substance, mechanical explosion.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_122\_130

*Received* 05.01.2023

*Revised* 15.09.2023

*Accepted* 20.09.2023

### **For citation:**

*Askerov K.A., Ahmadova S.T.*

[Application of Express Methods for the Detection of Explosive Substances]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol.15, no. 3, pp. 122-130 (in Azerbaijani)*

## **Partlayıcı maddələrin aşkarlanması üçün ekspress-üsullarının tətbiqi**

**K.Ə. Əsgərov, S.T. Əhmədova**

*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**

Əhmədova Səidə / e-mail: saidaahmedovabaku@gmail.com

**Xülasə**

Məqalədə partlayıcı maddələrin əsas növləri, identifikasiya vasitələri verilmiş, partlayıcı maddələrin əsas xüsusiyyətləri, hissələri haqqında nəzəri biliklər təqdim edilmişdir. Həmçinin partlayıcı maddələrin aşkarlanması üçün ekspress üsullarının tətbiq xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir. Partlayıcı maddələrin təyin edilməsində yeni formatda yanaşma və müasir yeni texnologiyaların ən vacib istiqamətlərdən biri olduğu göstərilmişdir. Partlayıcı maddələrin aşkar edilməsində istifadə olunan texniki vasitələrinin beynəlxalq standartlara, uyğunlaşdırılması araşdırılmışdır. Partlayıcı maddələri müəyyən etmək üçün istifadə edilən cihazlar və onların xarakteristikaları təhlil olunmuşdur.

**Açar sözlər:** partlayıcı maddə, ekspress test, reagent, analitik tədqiqat, detektor, partlayıcı maddə izi, brizant partlayıcı maddə, mexaniki partlayış.

DOI 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_122\_130

УДК 21474

## **Применение экспресс-методов обнаружения взрывоопасных веществ**

**К.А. Аскеров, С.Т. Ахмедова**

*Азербайджанская Национальная академия авиации (пр. Мардакян 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

**Для переписки:**

Ахмадова Саида / e-mail: sayaahmedovabaku@gmail.com

**Аннотация**

В статье представлены основные виды взрывчатых веществ (ВВ), средства идентификации, а также теоретические знания об основных свойствах и составных частях взрывчатых веществ. Также определены особенности применения экспресс-методов обнаружения взрывчатых веществ. Показано, что новый форматный подход и современные новые технологии являются одним из важнейших направлений в определении ВВ. Исследована адаптация технических средств, используемых при обнаружении взрывчатых веществ, к международным стандартам, проанализированы устройства, используемые для идентификации взрывчатых веществ, и их характеристики.

**Ключевые слова:** взрывчатое вещество, экспресс-тест, реagent, аналитическое исследование, детектор, след взрывчатого вещества, механический взрыв.

## Giriş

Son illər dünyanın bir çox regionlarında terrorist aktivliyi sürətlə artmışdır və bəşəriyyət üçün qlobal təhlükəyə çevrilməsi qorxusu yaranmışdır. Terror aktından hökumətlərə, cəmiyyətə, siyasi əleyhdarlara təzyiq vasitəsi kimi tez-tez istifadə edilir. Nəqliyyat vasitələri terroristlər üçün daha cəlbedicidir. Nəqliyyatda edilən terror aktları bir qayda olaraq, çoxsaylı təlafatlarla müşahidə olunaraq iqtisadiyyatın mühüm sahələrini iflic edir, böyük rezonans yaradır və cəmiyyətdə stabilliyi pozur.

Mülki aviasiyanın fəaliyyətinə qanunsuz müdaxilə aktları yüksək sosial təhlükədir. Terroristlər insanların sağlamlığına, mülkiyyətinə qəsd edərək Beynəlxalq hüququ və dövlət müstəqilliyini kobud surətdə pozurlar. Məhz bu vəziyyət bütün dünya hökumətlərini terrorizmlə mübarizə metodlarının effektiv vasitə və həlli yollarını axtarmağa məcbur edir. Bu və digər səbəblər Aviasiya təhlükəsizliyi (AT) sistemində tətbiq olunan xüsusi texniki vasitələrin təkmilləşdirilməsini və tətbiq edilməsini tələb edir.

Sərnişin təyyarəsinin konstruksiyası bortda baş vermiş partlayışa son dərəcə zəifdir (həssasdır): Britaniya mütəxəssisləri tərəfindən keçirilmiş sınaqların nəticələrinə əsasən hətta uçuş şəraitində alüminium konstruksiyada üç millimetr kiçik dəşik ekipaj heyəti və sərnişinlər üçün faciə ilə nəticələnmə bilər.

22 dekabr 2001-ci ildə baş vermiş hadisə göstərdi ki, ayaqqabıda keçirilmiş 50-100 q TNT tərkibli kiçik partlayıcı qurğu təyyarəni məhv etmə bacarığına malikdir. Bu vaxta kimi HG-nin istismara yararlı olmaması üçün ən azı 400-500 q TNT partlayıcı maddənin olması kifayət idi.

21 dekabr 1988-ci ildə Şotlandiyanın səmasında "Boinq-747" tipli HG-dəki məşhur partlayış 450 q TNT-nin ekvivalenti olan Sem-

tex partlayıcı maddəsinin yüküylə yaranmışdı [1].

Məlumdur ki, qloballaşan dünyada effektiv, səmərəli təhlükəsizliyin yüksək səviyyədə təmin olunması kritik obyektlərin mühafizəsində önəmli məsələdir. Dünyada baş verən terror hadisələri aviasiya təhlükəsizliyi sistemi qarşısında qlobal problem kimi qalmaqdadır. Təhlükəli əşya və maddələrdən ibarət terror vasitələrinin aeroportlarda baxış məntəqələrindən yayınaraq təyyarənin bortuna və ya aeroportun həyatı əhəmiyyətli obyektlərinə keçirilməsi ehtimalı yüksəkdir.

## İşin məqsədi

Mülki aviasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsi məqsədi ilə innovativ texnologiyalarının ekspress üsulların tətbiqi nəticəsində üstün parametrlərə malik partlayıcı maddələri aşkarlayan qurğunun yaradılması texnologiyasının işlənilməsi hazırlanmasıdır.

Hal-hazırda bütün növ bərk və maye partlayıcı maddələrin (TNT, TEN, PETN, RDX, HMX, NG və s.), eləcə də plastik partlayıcı maddələrin (C1-C4, Semteks, Detasheet və s.), keramikadan hazırlanmış odlu və soyuq silahların, mayələrin, xüsusilə də mulyaj olunmuş halda 100% ehtimalla aşkarlanması Beynəlxalq aviasiya təhlükəsizliyi sistemləri qarşısında qlobal bir problem kimi qalmaqdadır.

**Partlayıcı maddələr (PM).** Zərbə, təzyiq, istilik və s. bu kimi xarici təsirlərdən kimyəvi reaksiyaya girərək ətraf əşyaların zədələnməsinə səbəb olan miqdarda istilik ayıran, təzyiq yaradan, habelə qaz ifraz edən bərk və ya duru kimyəvi birləşmələrə və ya qarışıqlara partlayıcı maddələr deyilir [2].

**Partlayış** - qısa vaxt ərzində küllü miqdarda enerji ayrılmasıdır. Partlayış yüksək dərəcədə qızmış qazla (plazma) və genişlənmə vaxtı dağıdıcı qüvvəyə malik təzyiqlə müşahi-

də olunur. Partlayış bərk mühitdə baş verdikdə zərbə dalğasından əlavə, o, dağıdıcı qüvvəyə malik xırdalanmış hissəciklərlə də müşayiət olunur. Partlayış kimyəvi enerjinin, məsələn, nüvə (nüvə partlayışı) və elektromaqnit enerjilərinin (qılgılcım boşalması, lazer şüası və s.) ayrılması hesabına baş verir.

**Mexaniki partlayış** bağlı fəzada təzyiqin tədricən artması hesabına baş verir. Təzyiq rezervuarın divarlarının möhkəmliyindən böyük olduqda partlayış baş verir.

**Kimyəvi partlayış.** Bir anda bərk və ya maye PM qaza çevrilir və o, əvvəlki həcmindən 1500 dəfə böyük olur. Qazın genişlənməsi 1 san-də 5 milə (1mil=1609m), temperaturu isə 3000-4000°C-yə çatır. Tam çevrilmə prosesi mikrosaniyələr qədərdir və güclü səs və zərbə ilə müşayiət olunur [3].

### **Partlayıcı maddələr 3 qrupa bölünür:**

1. İnisasiya partlayıcı maddələri-həssaslığı çox olan
2. Brizant partlayıcı maddələri-həssaslığı az olan
3. Atma üçün istifadə olunan partlayıcı maddələr.

**1. İnisasiya partlayıcı maddələri** – həssaslığı çox olur, onlar (külək, səs yanında keçəndə) və impulsverici kimi istifadə olunurlar. Bu cür maddələr az miqdarda bombalara doldurulur. Çünki orada onlar katalizator kimi özlərini biruzə verirlər, ancaq onların partlayış həcmi kiçik olur (belə maddələrlə işləmək çox çətin olur).

**2. Brizant partlayıcı maddələri (“brizant” fransız dilində parçalanma deməkdir)**  
3 sinfə bölünürlər:

1. Çox güclü (heksogen, ten, tetril)

2. Normal (orta) güclü (tratil, melinit)

3. Zəif güclü (barıt)

Bu maddələr bombaların əsas partlayıcı hissəsidir. Onların həssaslığı az olur və partlayış etmək üçün xüsusi gücə ehtiyacı var.

**3. Atma üçün istifadə olunan partlayıcı maddələr.** Onlara ferverqlərdə istifadə olunan maddələr daxildir (pirotexnika sənəti var: onlar bu maddələri xüsusi birləşmələrdən hazırlayırlar).

**Partlayıcı maddələrin əsas xassələri aşağıdakılardır:**

1. Normal aqreqat vəziyyət
2. Detanasiya sürəti
3. Brizantlıq
4. Fuqaslıq
5. Həssaslıq
6. Sıxlıq
7. Kimyəvi dayanıqlıq.

Partlayıcı maddələr müxtəlif vəziyyətdə olur: maye, bərk, tor, noxud halıda ola bilərlər. Buna görə də onlar öz sıxlığına görə seçilir.

Brizantlıq-Qess üsulu təyin olunur. Bunun üçün çuqun plitənin üstündə 2 ayrı-ayrı hündürlükdə olan silindrlərin arasına az miqdarda (25-50q) partlayıcı maddənin nümunəsi qoyulur. Partlayış nəticəsində üst silindr əriyərəkən göbələk formalı papaq formasını alır. Şəkildəki silindrin hündürlüyü isə dəyişilir, əvvəlki və sonrakı hündürlüyünün fərqi brizantlıqı təyin edir.

**Fuqaslıq** – dağıntının dərəcəsini bildirir. Trausl üsulu ilə təyin olunur. Bunun üçün silindr formasında qurğuşundan xüsusi bomba hazırlanır və onun içində balaca kanal açılır. Həmin kanalın ilkin həcmi su içinə doldurularaq ölçülür, sonra isə partlayıcı maddənin az miqdarını içəridə partladılıb və əmələ gələn boşluğun həcmi ölçülür.  $\Delta V$ -ni tapırlar və bu fuqaslığın dərəcəsini bildirir.

Həssaslıq – çox vacib bir xassədir, çünki buna görə insan həyatı bu cür maddələrlə işləyərkən təhlükə altında olur. Həssaslıq maddələrin həssaslığını artırmaq üçün xüsusi maddələr qatılır – qum, yaqut, şüşə qırıntıları. Bu cür maddələrə sensabilizatorlar deyilir. Onların həssas partlayıcı maddələrin gücünü artırması ondan irəli gəlir ki, qırıntıların iti yerlərində əlavə enerji toplanır [3].

Elə maddələr var ki, su, yağ, parafin və s. fleqmatizatorlar deyilir. Onlar digərlərdən fərqli olaraq partlayıcı maddələrin molekullarının üstündə əlavə qat yaranır və enerji bu məqamda azalır.

Partlayıcı qurğuların növləri və partlayıcı qurğuların aşkar edilməsi. Partlayıcı qurğular 2 qrupa bölünür: 1) Əldə düzəldilmiş partlayıcı qurğular; 2) Zavodda düzəldilmiş partlayıcı qurğular.

Zavod üsulu ilə düzəldilmiş partlayıcı qurğular normativ texniki sənədi ilə olur. Əldə düzəldilmiş qurğularda hər hansı bir hissəni insan özü düzəldir. Buna görə də belə qurğulara həmişə 2 element daxil edilir: I. Korpus; II. Partlayıcı vasitə.

Bundan əlavə belə konstruksiyalara saat mexanizmi, impulsverici mexanizmlər daxildir. Buna görə partlayışdan sonra qalan qalıqlardan (boru hissələri, butulka və s.) bilmək olur. Partlayıcı vasitə detonatordan və detektoru işə salan mexanizmdən ibarətdir. Bu mexanizm 5 qrupa bölünür: 1. Mexaniki; 2. Elektriki; 3. Kimyəvi; 4. Elektron; 5. Kompleks şəkildə (asarti).

Partlayıcı qurğular istifadəsinə görə aşağıdakılara bölünür: 1) Əvvəlcədən obyektə qoyulmaq şərtilə. Bunun üçün terroru həyata keçirmək istəyən şəxs hər hansı obyektə daxil olmalıdır. Belə qurğular ya açıq formada qoyulur, yaxud gizli (videokaset, maqnitofon,

qənd kisəsi); 2) Poçt göndərmələri üsulu ilə. Partlayış məktub açılarda baş verir; 3) Nəqliyyat vasitəsilə.

Partlayıcı qurğuların əsas hissələri aşağıdakı kimi təsnif olunur. Partlayıcı maddələrin buxarları, partlayıcı maddələrin izləri, maddələrin aşkarlanması üçün ekspress üsullar vardır. Partlayıcı maddələrin izlərinin çıxarılması və onlarla kimyəvi reaksiyaların aparılması, o cümlədən maddənin yanma sınağı zamanı nümunənin götürülməsi daxildir. Ekspress üsulla partlayıcı maddələrin izlərinin səthi üzərindəki partlayıcı buxarların aşkar edilməsi, partlayıcı maddələrin rentgen və neytron analizi, maye, kristal formada partlayıcı maddələrin və partlayıcı maddələrin səthində aşkar edilməsi daxildir. Spektroskopiya ilə obyektə birbaşa olaraq təyin etmək mümkündür. Bəzi partlayıcı maddələr yüksək uçuculuq qabiliyyətinə malikdir. Əldəqayırma partlayıcı maddələrin izləri partlayışdan sonra cisimlərdə 4 saatdan çox olmayaraq qalır. Tez alışan mayələr və oksidləşdirici maddə, yanacaq qarışdırılaraq hazırlanır [4].

Plastik partlayıcı maddələrin aşkar edilməsinin asanlaşdırılması üçün, 1991-ci ildə beynəlxalq birlik tərəfindən onların çox uçuca maddələrlə nişanlanması haqqında Konvensiya qəbul edilmişdir.

Partlayıcı maddələri aşkar etmək üçün, qaz xromotoqrafiya metodundan, ionların spektrometriya dreyfindən və kütlə spektrometriyasından, xemilyuminessent metodundan (“Edelveys-4”), rəngli selektiv analitik reaksiyalar əsasında kolometrik metoddan istifadə edirlər. Partlayıcı maddələri müəyyən etmək üçün istifadə edilən cihazlar və onların qısa xarakteristikaları cədvəl 1-də göstərilmişdir (şək. 1).



**Şəkil 1** – Partlayıcı qurğunun əsas hissələri (1 - partlayıcı qurğunun qutusu; 2 – partlayıcı maddənin enerji mənbəsi 3 – maqnit; 4- plastik partlayıcı maddə (C-4))

**Figure 1** – The main parts of the explosive device (1 - the box of the explosive device; 2 - the energy source of the explosive substance; 3 - magnet; 4 - plastic explosive substance (C-4))

**Cədvəl 1** – Partlayıcı maddələri müəyyən etmək üçün istifadə edilən cihazlar və onların xarakteristikaları

**Table 1** – Devices used to identify explosives and their characteristics

Model, istehsalçı firma	Təyinatı, detektə etmə üsulu	Aşkar edilə bilən Partlayıcı maddələrin tipi	Həssaslıq, müəyyən etmə müddəti
“EDELVEYS 3”, Rusiya	Hava gəmilərinin salonlarının, bölmələrinin və PM ilə təmasda olan insanların aşkar edilməsi üçün; Elektronun zəbt edilməsi qazoxromotoqrafik detektor	Dinamit, trotil, plastik PM	3x109q/m <sup>3</sup> ; 15san
“EDELVEYS 4”,Rusiya. “EGIS”,The medics Inc., ABŞ.	Qazoxromotoqrafik. Qazoxromotoqrafik, xemilyuminisent detektor	Dinamit, trotil, plastik PM Dinamit, trotil, plastik PM	5x10-10 q/m <sup>3</sup> ; 120 san 10-11 q plastik partlayıcı maddə
“IONSCAN”, Barringer Instruments Inc., ABŞ-Kanada	Partlayıcı zəhərləyici, narkotik maddələrin aşkar edilməsi üçün; plazma xromotoqrafiyası (İonların yüüklüyünün spektrometriyası)	Dinamit, trotil, plastik PM	10-10 – 10-11q Plastik Parlayıcı maddə
“ITEMISER”, Ion Track Instruments, ABŞ	Adi partlayıcı maddələr, TSN daxil olmaqla narkotiklər, dinamit, Semtex aşkar edilməsi üçün. İonların yüüklüyünün spektrometriyası	Dinamit, trotil, plastik PM	(1-3saat)x10-10 q partlayıcı maddə (probda); 100-300 piktoqramm (həm narkotik, həm də PM üçün
“EVD-3000”, Scintrex Security Systems,Kanada. “EVD-8000”, Scintrex Security	PM-in termik parçalanması nəticəsində əmələ gələn NO <sub>2</sub> -qrupunun qeydiyyatı Qazoxromotoqrafik	Əksər hərbi və Kommersiya partlayıcı maddələri Əksər hərbi və Kommersiya partlayıcı maddələri	5x10-11 q 10-12 q

PM-i aşkar edən vasitələrin təhlili onu göstərir ki, hal-hazırda PM-i aşkar edən qurğular sırasında elə bir universal vasitə yoxdur ki, o terror aktlarına qarşı dayana bilər.

Qazanalizatorların üstün cəhətləri: iş qabiliyyəti qeyri-məhdudur; PM-i təsdiq edir; nəzarətin nəticələrini sənədləşdirir. Qazanalizatorlar iki əsas parametrlə xarakterizə olunur: həssaslıq və selektivlik.

Həssaslıq-analitik cihazın qəbul etdiyi maddənin minimal miqdarı, yaxud buxarının havadakı konsentrasiyasıdır.

Selektivlik-kimyəvi maddələri effektiv ayıra bilmək qabiliyyətidir.

Cihazın həssaslığının və selektivliyinin aşağı olması cihazın maneəyədavamlığını aşağı salır və yalan işə düşmələrin sayını artırır. Mükəmməl qurğularda bu iki parametrinin ikisinin də yüksək olması lazımdır. Birinin yüksək, digərinin aşağı olması cihazın etibarlılığını azaldır, tətbiqini məhdudlaşdırır və həmin cihazdan yalnız PM-nin olub-olmadığını təqribi aşkar etmək lazım gəldikdə istifadə olunur.

PM doymuş buxarın yaratdığı təzyiqlə və uçuculuq qabiliyyətinə görə bir-birindən fərqlənirlər. Bu parametrləri yüksək olan PM-in qazanalizatorlar tərəfindən aşkar olunması problemsizdir. Nitroqliserin və digər nitroefir əsaslı PM-də doymuş buxarın təzyiqi yüksək, uçuculuq qabiliyyəti kiçik, tetril, trotil, di və trinitrotoluol kimi partlayıcı maddələrdə isə uçuculuq qabiliyyəti yüksək, doymuş buxarın yaratdığı təzyiqlə kiçikdir. Plastik PM-in qazanalizatorlarla aşkar olunması öz effektivliyini itirir və mürəkkəbləşir. Belə ki, plastik PM-nin əsasını təşkil edən heksogen, oktogen və TEN maddələri polimerlərlə hermetik lehimləndiyindən onların uçuculuq qabiliyyəti sıfıra bərabər olur.

PM-in effektiv aşkar olunmasını xarakterizə edən faktorlardan biri də PM-nin hansı temperatur şəraitində aşkar olunmasıdır. Belə ki, ətraf mühitin temperaturunun  $5^{\circ}\text{C}$  aşağı düşməsi trotilin doymuş buxarının təzyiqinin 2 qat aşağı düşməsinə, səbəb olur.

Hava şəraitinin uzun müddət aşağı temperaturda müşayiət olunması qazanalizatorların tətbiqini məhdudlaşdırır və problemlər yaraadır. Bu halda PM-i aşkar edən digər qurğulara həssaslıq baxımından daha sərt tələblər irəli sürülür. Havanın temperaturunun aşağı düşməsi eyni zamanda kinoloji xidmətin də işinə böyük təsir göstərir.

PM-i aşkar edən qazanalizatorlar 2 əsas metod əsasında istehsal olunur dreyf spektrometriyası və qaz xromatoqrafiyası və bu cihazlar yerinə yetirdiyi funksiyalara görə iki yerə bölünür: detektorlar və analizatorlar. Detektorlar portativ cihaz olub, havada yalnız PM molekullarının mövcudluğunu təyin edir.

Detektorla PM aşağıdakı üsulla aşkar olunur: obyektin üzərindən hava sorulur. Detektorların iş prinsipi ion dreyfi spektrometriyası üsuluna əsaslanır. Aşkarlama prosesi real vaxt rejimində aparılır. Obyekt üzərindəki havadan götürülmüş nümunə salfetə bükülür.

Bu vaxt nümunəki molekullar bir yerə yığılır. Sənədlərə, insana bu üsulla baxış keçirilərkən səthlər salfetlə silinir. Bu məqsədlə analizatorlar xüsusi nümunə götürən içərisində salfetka yerləşdirilmiş portativ tozsoran qurğu ilə təchiz olunurlar. Bu üsulla baxış keçirilərkən səthlər salfetlə silinir. Bu məqsədlə analizatorlar xüsusi nümunə götürən içərisində salfet yerləşdirilmiş portativ tozsoran qurğu ilə təchiz olunurlar. Bu üsulla nümunə detektorlarda olduğu kimi distansion məsafədən götürülür.

Nümunə götürülmüş salfet analizatora daxil edilir. Qazötürücü təsir qaz vasitəsilə

analitik bloka ötürülür. Bu, kənar faktorların nümunəyə edilə biləcək xarici təsirləri kifayət qədər azaldır.

Xromatik analizatora nümunə götürülmüş nümunənin sudakı məhlulu şəklində də daxil edilə bilər. Qaz xromatoqrafiyası üsulu əsasında yüksəksürətli analiz müddəti bir neçə saniyə olan əks antiterror aktlarının qarşısında əvəzsiz rol oynayan portativ qurğular istehsal olunmuşdur.

Portativ cihazlar qaçaqmalçılığın, narkotik maddələrinin aşkar olunmasında baqaja kompleks baxış keçirilməsində böyük rol oynayır.

Dünya bazarında hal-hazırda qazanalizatorlar üzrə ən böyük istehsalçıları "GE İON Track" və "Shimiths Detection" şirkətləridir. Bu şirkətlər laboratoriyalarda, gömrük və aviasiya təhlükəsizliyi nəzarətində tətbiq üçün

stasionar, portativ, portal şəkilli geniş çeşiddə müasir cihazlar istehsal edir.

Keçid portalları metalxətlərə oxşar II şəkilli çərçivədən ibarətdir. Funksiyası kontaktsiz üsulla şəxslərin üzərində partlayıcı və narkotik maddələri aşkar etməkdən ibarətdir.

Partlayıcı maddələrin detektoru "M- İon" funksiyası PM-in buxarlarını və izlərini aşkar edib, onun tipini identifikasiya etməkdən ibarətdir. Aşkar olunma və identifikasiya obyekt üzərindən hava sorub nümunə götürmək yolu ilə yerinə yetirilir. Detektorda radioaktiv ionlaşma mənbəyi yoxdur və işi ion dreyfi qeyri-xətti spektrometriyası prinsipinə əsaslanır.

Detektor həssaslığa görə aşağıdakı xarakteristikalara malikdir (cədvəl 2):

- analiz olunan hava nümunəsində TNT buxarlarına görə aşkar olunma həddi -  $1 \cdot 10^{-14}$  q/sm<sup>3</sup>
- TNT üzrə aşkar olunan minimal kütlə həddi – 50 nq.

**Cədvəl 2** – Partlayıcı maddələrin detektoru "M- İon" texniki xarakteristikalar

**Table 2** – Explosives detector "M-Ion" technical characteristics

Analiz olunan hava nümunəsində PM-ni aşkar etmə müddəti, san	< 2
Akkumulyator blokundan fasiləsiz iş müddəti, saat	> 4
Şəbəkə blokundan fasiləsiz iş müddəti saat	> 8
Akkumulyator gərginliyi, V	24
Analitik blokun sərf etdiyi güc, V·A	< 35
İşçi temperatur diapazonu, °C	+5...+50
Nisbi rütubət (T=35°C)	95
Analitik blokun kütləsi, kq	< 4

Detektorlar nitroefirlər, nitroqliserin (dinamit) və trotil kimi tez uçuculuq qabiliyyətinə malik PM-in aşkar edilməsində əvəzsizdir. Detektorlardan fərqli olaraq, analizatorlar PM-ni aşkar etməklə yanaşı, PM-lər haqqında verilmiş bazasından istifadə etməklə analiz nəticələrinin emalı sayəsində həm də onun konkret tipini müəyyənləşdirir. Analizatorlarda obyekt üzərindən nümunə götürülməsi vacib olduğuna görə analiz müddəti detektorda-

kına nisbətən böyükdür. Analizatorlar kifayət qədər qabarit ölçülərə malikdirlər, tələb etdiyi enerji də böyükdür. Analizatorların detektorlara nəzərən üstünlüyü analizatorların daha etibarlı və dəqiq məlumat əldə edə bilməsidir. Analizatorların bir üstünlüyü də onlarda hər iki üsulun qaz xromatoqrafiyası və dreyf spektrometriyasının tətbiq edilə bilməsidir. Belə ki, detektorlarda obyektin üzərindən nümunə avtomatik götürüldüyü halda, analiza-

torlarda nümunəni götürmək üçün xüsusi başlıq vardır. İon dreyfi spektrometriyası üsulu cəldliyi və analiz müddətinin qısa olması ilə fərqlənir [5, 6].

### **Nəticə**

Terrorizmə qarşı effektiv əks qarşılıqmanın bir yolu da aidiyyəti olan orqanların xüsusi texniki vasitələrlə təchiz olunmasıdır. Bu texniki vasitələrin ən öndə vəzifəsi birinci növbədə PM və PQ-1, güclü zəhərləyici və radioaktiv maddələri, odlu və soyuq silah-sursatı aşkar etməkdən ibarətdir. Hava limanı infrastrukturunda əsas kritik obyektlər hava gəmiləri, potensial partlayış mənbəyi olan YSM anbarları, naviqasiya binaları, texniki xidmət obyektləridir.

Bunun üçün aeroport və aviasirkətlərin ən müasir avadanlıqlarla təchiz olunması günün vacib məsələlərindəndir. Aşkarlayıcı vasitələrin iş prinsipi müxtəlif fiziki metallara

əsaslanır. PM və qurğuları aşkar edən tətbiq olunan geniş ənənəvi əl yüklərinə və baqaja baxış keçirmək üçün rentgen televiziya introskoplarıdır. Bu qurğuların iş prinsipi tomoqrafiya, transmissiya, difraksiya və əks yayılma texnologiyaları əsaslanan PM-i ən böyük ehtimalla effektiv aşkar edən texniki vasitələridir. PM-in tərkibi əsasən azot, oksigen, karbon və hidrogendən ibarətdir. Hər bir PM-də bu elementlərin konsentrasiyası müxtəlifdir. Odur ki, PM elementlərin konsentrasiyasına görə aşkar etmək həmişə mümkün olmur. PM-i effektiv aşkar edən qurğulardan biri də işi qazxromatografiyası prinsipinə yəni maddələrin buxarlarının analizinə əsaslanan qazanalizatorlardır.

### **Maraqlar münaqişəsi**

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

## **REFERENCES**

1. **Moskvina L.N.** Analytical instruments. Guide to laboratory, portable and miniature devices English. / - St. Petersburg.: *TsOP "Professiya"*, 2009 (in Russian)
2. **Dildin Yu.M., Martynov V.V., Semenov A.Yu., Shmyrev A.A.** Industrial explosive devices and their forensic investigation: textbook. allowance VNKTs MVD USSR, 1991. (in Russian)
3. **Tuzkov Yu.B., Martynov V.V., Semenov A.Yu., Prozorov A.A.** Explosives and their characteristics textbook. allowance / - M.: *GUEKTS of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2002. (in Russian)
4. **Soloviev M.Yu., Tuzkov Yu.B., Semenov A.Yu.** Study of improvised explosives in the practice of explosive expertise. Hexamethylene triperoxide diamine // Expert practice. - M.: *EKTs of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2007. - No. 63. (in Russian)
5. **Kuzmin V.V., Soloviev M.Yu., Tuzkov Yu.B., Semenov A.Yu.** Study of improvised explosives in the practice of explosive expertise. Acetone // Expert practice. - M.: *ECC of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2007. - No. 62. (in Russian)
6. <http://www.ama.com.az/VOLUME10-N4.pdf>

## MƏQALƏLƏRİN TƏRTİBATI QAYDALARI

Jurnalın redaksiya heyəti jurnalın elmi istiqamətinə uyğun gələn, heç bir yerdə nəşr olunmayan, digər jurnallara verilməyən məqalələrin əlyazmalarına baxır.

Hazır məqalə redaksiyaya, [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com) elektron ünvanına göndərilməlidir.

Məqalə azərbaycan, ingilis və ya rus dillərində 10 səhifədən çox olmamaq şərti ilə yazıla bilər və aşağıdakıları özündə əks etdirməlidir:

1. Məqalənin adı, müəlliflərin A.A. Soyadı, hər bir müəllifin çalışdığı müəssisənin adı və ünvanı;
2. Müəlliflərdən birinin E-maili;
3. Xülasə, 1000 simvol;
4. Açar sözlər, 6 sözdən çox olmayaraq;

Bütün bu məlumatlar hər üç dildə təqdim olunmalıdır.

5. *Giriş, İşin məqsədi, Məsələnin qoyuluşu, Məsələnin həlli, Nəticə* - bölmələri ilə məqalənin mətni;

6. UOT kodu;

7. İstifadə olunmuş mənbələrin latın dilində transliterasiya edilmiş mətninin siyahısı (7-10 aralığında), mənbə haqqında tam məlumat. Həmçinin "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri" jurnalına istinad. Siyahı təsadüfi yolla deyil, mətdəki istinadların sırasına əsasən (1, 2, 3...) tərtib olunur.

8. Şəkil və cədvəllərin məqalənin yazıldığı dildə adları, həmçinin, onların ingilis dilinə tərcüməsi. Şəkil və cədvəllər birbaşa məqalənin mətnində onlara istinadların yanında yerləşdirilməlidir.

Redaksiyaya daxil olmuş məqalələr plagiat yoxlama prosedurundan keçir. Orijinallıq indeksi azı 75% olmalıdır.

Məqalələrə redaksiya heyəti tərəfindən təyin olunmuş elmlər doktorları və ya namizədləri rəy verir. Məqalələrə rəy vermək üçün redaksiya heyəti və şurası üzvləri, eləcə də aparıcı mütəxəssislər cəlb edilir. Rəyin verilmə müddəti 3 aya qədərdir. Məqaləyə mənfi rəy verildiyi halda redaksiya bu barədə müəllifə məlumat verir. Müəlliflərin təkrar düzəlişlərindən sonra məqalə yenidən rəyçilərə göndərilir, sonra isə rəyçinin son rəyinə əsasən redaksiya heyəti məqaləni nəşr üçün təsdiqləyir və ya imtina edir. Redaksiya mətni redaktə etmək hüququna malikdir.

Mətnin yenidən yığılması zamanı yarana biləcək nöqsanları aradan qaldırmaq məqsədi ilə məqalə mətni Word for Windows formatında, Times New Roman 12 şrifti, 1,15 interval ilə elektron şəkildə də redaksiyaya təqdim edilməlidir.

Əlyazmanın nəşri üçün müəlliflərdən ödəniş alınmır.

Daha çox məlumat və məqalənin tərtibatı nümunəsi saytda: [ama.com.az](http://ama.com.az)

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Редколлегия журнала рассматривает статьи, которые соответствуют научному профилю журнала, нигде ранее не опубликованы и не переданы в редакции других журналов.

Готовую статью следует направить в редакцию на e-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com).

Статья может быть написана на азербайджанском, английском либо русском языке общим объемом не более 10 страниц и должна включать в себя:

1. Название статьи, И.О. Фамилию авторов, наименования и адреса организаций, где работают авторы;
2. E-mail одного из авторов для переписки;
3. Аннотацию (около 1000 символов);
4. Ключевые слова (до 6 слов).

Вся вышеперечисленная информация должна быть переведена на три языка.

5. Текст статьи с разбивкой на *Введение, Цель работы, Постановка задачи, Решение задачи, Заключение*;

6. Код УДК;

7. Транслитерированный на латинице список использованной литературы (в пределах 7–10) с указанием полных библиографических данных об источнике. В том числе ссылка на журнал «Вестник Азербайджанской Инженерной Академии». Список составляется в порядке указания ссылок в тексте по возрастающей: 1, 2, 3..., а не вразброс.

8. Названия рисунков и таблиц на языке написания статьи плюс их перевод на английский язык. Рисунки и таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи рядом со ссылками на них.

Поступившие в редакцию рукописи проходят процедуру проверки на плагиат. Индекс оригинальности должен составлять не менее 75%.

Статьи рецензируются докторами и кандидатами наук, назначаемыми редакционной коллегией. К рецензированию статей привлекаются: члены редколлегии, редсовет и ведущие специалисты. Срок рецензирования составляет до 3 месяцев. В случае замечаний к статье редакция свяжется с автором. После повторного авторского редактирования статья направляется для повторной рецензии, а затем на основании окончательного заключения рецензента редколлегия утверждает статью для публикации либо отклоняет. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения.

С целью исключения опечатки при верстке статьи просьба прислать текст и рисунки в электронном виде в формате Word for Windows, шрифт Times New Roman 12, интервал 1,15.

Плата с авторов за публикацию рукописи не взимается.

Более подробная информация и образец оформления статьи – на сайте: [ama.com.az](http://ama.com.az)

## ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES

The editorial board of the journal reviews articles that correspond to the scientific profile of the journal, have not been published anywhere and have not been submitted to the editors of other journals.

The finished article should be sent to the editorial office by e-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com)

The article can be written in any of three languages: Azerbaijani, English or Russian (max 10 pp.) and must include:

1. Title of the article, Name, Middle Name (if applicable), Surname of authors, names of organizations of each author and addresses of organizations;
2. E-mail of one of the authors;
3. Abstract (about 1000 characters);
4. Key words (up to 6 words).

All of the above information must be translated into three languages.

5. The text of the article with a breakdown into *Introduction, Purpose of work, Problem statement, Problem solution, Conclusion*.

6. Universal Decimal Classification code, also known as УДК.

7. The transliterated in the Latin alphabet the list of used References (min 7 – max 10) with full bibliographic data on the source, including a link to journal "Herald of the Azerbaijan Engineering Academy". The list is compiled in the order of the references in the text (1, 2, 3 ...), and not randomly.

8. Titles of figures and tables in the language of writing the article plus their translation into English. Figures and tables are located directly in the text of the article next to the mandatory links to them.

The submitted manuscripts undergo a plagiarism check procedure. The originality index must be at least 75%.

Articles are reviewed by doctors or candidates of sciences appointed by the editorial board. The following are involved in reviewing articles: members of the editorial board, editorial board and leading experts. The review period is up to 3 months. In case of comments on the article, the editors will contact the author. After repeated author's editing, the article is sent for re-review, and then, based on the final opinion of the reviewer, the editorial board approves the article for publication or rejects it. The editors reserve the right to make editorial changes.

In order to avoid typing errors in the layout of the article, please send the text and figures in electronic form using format .docx of Microsoft Word, and font Times New Roman 12, interval 1,15.

No fee is charged from the authors for the publication of the manuscript.

More detailed information and a sample article formatting can be found on the website: [ama.com.az](http://ama.com.az)

Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının  
**XƏBƏRLƏRİ**  
*Beynəlxalq elmi-texniki jurnal*

**HERALD**  
of the Azerbaijan Engineering Academy  
*The international science-technical journal*

**ВЕСТНИК**  
Азербайджанской Инженерной Академии  
*Международный научно-технический журнал*

Cild 15. № 3  
Vol. 15. № 3  
Том 15. № 3

**BAKİ – 2023**

İnformasiya şöbəsinin müdiri  
***Naila Əskərova***

Nəşriyyat və yayım şöbəsinin müdiri  
***Akif Dənziyev***

Korrektor  
***Pərvin Süleymanova***

**“Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının  
XƏBƏRLƏRİ”**

jurnalı redaksiyanın kompyüterlərində yığılmış və  
hazır diapozitivlərdən “Apostrof-A”  
mətbəəsində ofset üsulu ilə çap olunmuşdur.

*Çapa imzalanıb 28.09.2023,  
formatı 60x84 1/8,  
kağız ofset, f.ç.v. 16.5  
Tirajı 1105 əd.*