# 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 14. № 3
Vol. 14. № 3
Том 14. № 3

**BAKI – 2022**

# Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
# XƏBƏRLƏRİ
## *Beynəlxalq elmi-texniki jurnal*

**Baş redaktor – akademik A.M. Paşayev**
**Baş redaktorun müavini – akademik Ə.X. Canəhmədov**

***REDAKSİYA HEYƏTİ:***

akademik **Ə.M. Abbasov,** akademik **R.İ. Abdullayev,** akademik **H.S. Bağırov**,
akademik **N.H. Cavadov,** akademik **B.H. Əliyev,** akademik **C.C. Əsgərov**,
professor **A.Y. Qriqoryev** *(Belarus)*, akademik **A.Z. Quliyev,** akademik **B.V. Qusev** *(Rusiya)*,
akademik **H.Ə. Məmmədov**, akademik **G.H. Məmmədova,** akademik **H.F. Mirələmov,**
akademik **S.Y. Müslümov,** akademik **İ.R. Sadıqov**

***REDAKSİYA ŞURASI:***

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

---

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

**Chief editor – academician A.M. Pashayev**
**Deputy editor – academician A.Kh. Janahmadov**

***EDITORIAL BOARD:***

academician **A.M. Abasov,** academician **R.I. Abdullayev**, academician **B.H. Aliyev,**
academician **J.J. Asgarov**, academician **H.S. Bagirov**, professor **A.Ya. Grigoriev** *(Belarus)*,
academician **A.Z. Guliyev**, academician **B.V. Gusev** *(Russia);* academician **N.H. Javadov**,
academician **Q.A. Mamadov**, academician **G.H. Mamadova**, academician **H.F. Miralamov**,
academician **S.Y. Muslimov**, academician **I.R. Sadigov**

***EDITORIAL ADVISORY BOARD:***

professor **N. Antonesku** *(Romania);* professor **Konstantin Bravo** *(Israel);*
professor **F. Franek** *(Austria);* professor **K. Friedrich** *(Germany);* professor **G.S. Kalda** *(Poland);*
professor **Jung-Young Son** *(Korea);* professor **D. Mavrakis** *(Greece);*
academician **S.S. Neqmatov** *(Uzbekistan)*; 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);*
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 qeydiyyata 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 (htpp:/www.elibrary.ru).

Nəşr olunmuş məqalələrə DOI (Obyektin Rəqəmsal Identifikatoru) verilir.

Jurnal International Scientific Indexing (ISI) və Scientific Journal Impact Factor (SJIF) Beynəlxalq Elmi Sitatlaşma Bazalarına yerləşdirilib, SERTİFİKATLAR verilib, impakt faktor ISI – 1.327 və impakt faktor SJIF – 8.434.

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

Jurnal Web of Science və Global Impact Factor Beynəlxalq Elmi Sitatlama Bazasında yerləşdirilməyə təqdim olunub.

Jurnal texniki elmlər üzrə referativ məlumatların beynəlxalq ingilis dilli bazasına daxil edilmişdir – "INSPEC".

Jurnala "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
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 (htpp:/www.elibrary.ru).

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

Jounal was included into International Scientific Indexing (ISI) and Scientific Journal Impact Factor (SJIF), issued a CERTIFICATES, impact factor ISI – 1.327 and impact factor SJIF – 8.434.

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 and Global Impact Factor.

Journal was included into international English – language abstracts database on technical sciences "INSPEC"

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

***Address of editorial offices:***
Pushkin str., 30, 3 floor,
Baku, AZ 1010,
Azerbaijan Republic
Tel/Fax: (+99412) 598 24 52
E-mail: 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 (htpp:/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 – 1.327 и импакт фактор SJIF – 8.434.

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

Журнал представлен к размещению в международных базах научного цитирования Web of Science (WoS) и Global Impact Factor (GIF).

Журнал включен в международную англоязычную базу реферативных данных по техническим наукам INSPEC.

Подписка на журнал осуществляется в отделениях ОАО «АзерПочта» 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
http://ama.com.az

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

**© Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası, 2022**
**© Azerbaijan Engineering Academy, 2022**
**© Азербайджанская Инженерная Академия, 2022**

**M Ü N D Ə R İ C A T**

**A v i a s i y a**

**Sadıxov İ.Z.**
Müxtəlif zonalarda çıxarılan neftlərin flüoressensiya spektrlərinin ölçülməsi məqsədi ilə KA-14 LIDAR-ının kalibrovka edilməsi ..... 7

**M e x a n i k a v ə m a ş ı n q a y ı r m a**

**Canəhmədov Ə.X., Juravlev D.Y., Volçenko V.N., Balonnıy V.T., Malık V.Y.**
Triboqovşaqlarda xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikası (II hissə) ..... 12

**Volçenko D.A., Cavadov M.Y., Skrıpnık V.S., Volçenko N.A., Juravlev D.Y.**
Əyləc qurğularının sürtünmə cütündəki omik kontaktlarda elektrik cərəyan axını ..... 24

**Əhmədov H.M., Manafov E.K., Nəsirova M.M., Hüseynov F.H.**
Azərbaycanda Maqlev tipli qatarların tətbiqi perspektivləri ..... 41

**Hüseynov Ə.G., Nəzərov İ.Ə., Əsədov Ş.A.**
Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin diffuziya metallaşdırılma üsulu ilə möhkəmləndirilməsi ..... 54

**N e f t v ə q a z**

**Volçenko D.A., Mirələmov H.F., Bolonnıy V.T., Savçin M.V., Malık V.Y., Savçin Y.M.**
Dərin qazıma quyusunda borunun vəziyyətinin enerji qiymətləndirilməsi ..... 64

**İsmayılova F.B.**
Qaz resurslarının dinamikasına uyğun multifazalı səmt qazlarının səmərəli yığılması və nəqli ..... 74

**K i m y a v ə n e f t - k i m y a t e x n o l o g i y a s ı**

**Hüseynova E.A.**
İzopropil spirtinin çevrilməsinin nəzəri təhlili ..... 80

**İ n f o r m a s i y a t e x n o l o g i y a l a r ı**

**Əsgərov T.K., Rəhimova N.Ə., Abdullayev V.H.**
"Sənaye 4.0" platformasına əsaslanan kiber-fiziki sistemlərin struktur layihələndirilməsi ..... 87

**C i h a z q a y ı r m a**

**İbrahimov R.Ə., Svixnuşin N.M., Zeynalova A.E.**
Müdafiə sənayesi texnikasının seriyalı istehsalı zamanı nasazlıqlara avtomatlaşdırılmış nəzarət pultu ..... 96

**Əsgərov K.Ə., Mardaxayev A.V., Xidirov A.Ş.**
Torpaqların rütubətliliyinin ölçülməsinin dielkometrik metodu (TDR metod) ..... 104

**G e o l o g i y a**

**Hüseynov Q.S., Məmmədov İ.Ə.**
Geoloji kəşfiyyat işlərinin həlli üçün sərbəst qızılın tipomorf xüsusiyyətlərinin istifadəsi ..... 123

**C O N T E N T S**

**Aviation**

**Sadikhov I.Z.**
Calibration of KA-14 LIDAR to measure the fluorescence spectra of oils extracted in various zones ..... 7

**Mechanics and Mechanical Engineering**

**Janahmadov A.Kh., Zhuravlev D.Yu., Volchenko V.N., Balonniy V.T., Malyk V.Ya.**
Non-equilibrium thermodynamics with linear modes in tribocouplings (Part II) ..... 12

**Volchenko D.A., Javadov M.Y., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Zhuravlev D.Yu.**
Flow of electric currents in ohmic contacts of friction couples of braking devices ..... 24

**Ahmadov H.M., Manafov E.K., Nasirova M.M., Huseynov F.H.**
Prospects for the use of Maglev trains in Azerbaijan ..... 41

**Guseinov A.G., Nazarov I.A., Asadov Sh.A.**
Strengthening of parts of special-purpose products by diffusion metallization ..... 54

**Oil and Gas**

**Volchenko D.A., Miralamov H.F., Bolonniy V.T., Savchin M.V., Malyk V.Ya., Savchin Ya.M.**
Energy assessment of the state of pipe column in the deep well drilling ..... 64

**Ismayilova F.B.**
Efficient gathering and transport of associated multiphase gases in accordance with the dynamics of gas resources ..... 74

**Chemical and Chemical Technology**

**Guseinova E.A.**
Theoretical analysis of the conversion of isopropyl alcohol ..... 80

**Information Technology**

**Asgarov T.K., Ragimova N.A., Abdullayev V.H.**
Structural design of cyber-physical systems based on the “Industry 4.0” platform ..... 87

**Instrumentation**

**Ibragimov R.A., Svikhnushin N.M., Zeynalova A.E.**
Automated fault control panel during serial production equipment of defense industry technology ..... 96

**Asgarov K.A., Mardakhayev A.V., Khidirov A.Sh.**
The dielcometric method of measurement of soil moisture (TDR method) ..... 104

**Geology**

**Guseinov G.S., Mammedov I.A.**
The use of typomorphic features of native gold for the solution of geological exploration ..... 123

**С О Д Е Р Ж А Н И Е**

**Авиация**

**Садыхов И.З.**
Калибровка LIDAR KA-14 с целью измерения спектров флуоресценции нефти, добываемой в различных зонах ..... 7

**Механика и машиностроение**

**Джанахмедов А.Х., Журавлев Д.Ю., Вольченко В.Н., Болонный В.Т., Малык В.Я.**
Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжении (часть II) ..... 12

**Вольченко Д.А., Джавадов М.Я., Скрыпник В.С., Вольченко Н.А., Журавлев Д.Ю.**
Протекание электрических токов в омических контактах пар трения тормозных устройств ..... 24

**Ахмедов Г.М., Манафов Э.К., Насирова М.М., Гусейнов Ф.Г.**
Перспективы применения поездов Маглев в Азербайджане ..... 41

**Гусейнов А.Г., Назаров И.А., Асадов Ш.А.**
Армирование деталей изделий специального назначения методом диффузионной металлизации ..... 54

**Нефть и газ**

**Вольченко Д.А., Мираламов Г.Ф., Болонный В.Т., Савчин М.В., Малык В.Я., Савчин Я.М.**
Энергетическая оценка состояния колонны труб в бурящейся глубокой скважине ..... 64

**Исмаилова Ф.Б.**
Эффективный сбор и транспорт попутных мультифазных газов в соответствии с динамикой газовых ресурсов ..... 74

**Химия и химические технологии**

**Гусейнова Э.А.**
Теоретический анализ превращения изопропилового спирта ..... 80

**Информационные технологии**

**Аскеров Т.К., Рагимова Н.А., Абдуллаев В.Г.**
Структурное проектирование киберфизических систем на базе платформы «Индустрия 4.0» ..... 87

**Приборостроение**

**Ибрагимов Р.А., Свихнушин Н.М., Зейналова А.Э.**
Автоматизированный пульт контроля неисправностей при серийном производстве техники оборонной промышленности ..... 96

**Аскеров К.А., Мардахаев А.В., Хидиров А.Ш.**
О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы (TDR метод) ..... 104

**Геология**

**Гусейнов Г.С., Мамедов И.А.**
Использование типоморфных особенностей самородного золота для решения геологоразведочных работ ..... 123

# Calibration of KA-14 LIDAR to Measure the Fluorescence Spectra of Oils Extracted in Various Zones

## I.Z. Sadikhov

*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Sadikhov Ilham / e-mail: mrsadikhov90@gmail.com

**Abstract**

Laser sensing methods have been used since the 60s, and since the 90s this method has reached a new level along with the reduction in the cost of the element base, and the development of computer technology and software. Currently, the laser sensing method has been recognized as one of the most modern active methods of remote sensing of environment. KA-14 LIDAR (Light Detection and Ranging) developed at the National Academy of Aviation was successfully tested for the detection of oil pollution, and based on the analysis of fluorescence spectra of detected oil spills, distinctive features were observed between the spectra of oil samples extracted in the zones of the Absheron Peninsula. To create a database based on the spectra of various oil samples belonging to various Oil-Gas-Production Companies (OGPC), the KA-14 LIDAR calibration process was carried out, and the fluorescence spectra of the mentioned samples were measured using the calibrated KA-14 LIDAR. Author would like to note that the database based on these results can be used to determine the ownership of an identified oil leakage in the Absheron Peninsula.

**Keywords:** laser sensing, LIDAR, fluorescence, oil pollution.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_07_11

***Recieved*** *21.03.2022*
***Revised*** *16.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*I.Z. Sadikhov*
[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. 3, pp. 7-11 *(in English)*

# Müxtəlif zonalarda çıxarılan neftlərin flüoressensiya spektrlərinin ölçülməsi məqsədi ilə KA-14 LIDAR-ının kalibrovka edilməsi

## İ.Z. Sadıxov
*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**
Sadıxov İlham / e-mail: mrsadikhov90@gmail.com

**Xülasə**

Lazer zondlama üsulları 60-cı illərdən başlayaraq istifadə olunmağa başlamış və 90-cı illərdən etibarən bu üsul element bazasının ucuzlaşması, hesablama texnikasının və proqram təminatının inkişafı ilə birlikdə yeni bir səviyyəyə yüksəldi. Hazırda lazer zondlama üsulu ətraf mühitin ən müasir aktiv məsafədən zondlanma üsullarından biridir. Milli Aviasiya Akademiyasında işlənib hazırlanmış KA-14 LIDAR-ı (Light Detection and Ranging) neft çirklənmələrinin aşkarlanmasında uğurla sınaqdan keçirilmiş və aşkarlanan neft sızıntılarının flüoressensiya spektrlərinin analizi əsasında Abşeron yarımadasının müxtəlif zonalarında çıxarılan neft nümunələrinin spektrləri arasında fərqləndirici xüsusiyyətlər müşahidə olunmuşdur. Müxtəlif NQÇİ-nə məxsus neft nümunələrinin spektrləri əsasında verilənlər bazasının yaradılması məqsədi ilə KA-14 LIDAR-nın kalibrovka prosesi həyata keçirilmiş və kalibrovka edilmiş KA-14 LIDAR-ı vasitəsi ilə sözü gedən nümunələrin flüoressensiya spektrləri ölçülmüşdür. Qeyd etmək istərdik ki, bu spektrlər əsasında yaradılacaq verilənlər bazası aşkarlanan neft sızıntılarının Abşeron yarımadasının hansı zonasına aid olmasının müəyyənləşdirilməsində istifadə edilə bilər.

**Açar sözlər:** lazer zondlama, LIDAR, flüoressensiya, neft çirklənmələri.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_07_11

**УДК:** 535.372

# Калибровка LIDAR KA-14 с целью измерения спектров флуоресценции нефти, добываемой в различных зонах

## И.З. Садыхов
*Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Садыхов Илхам / e-mail: mrsadikhov90@gmail.com

**Аннотация**

В статье рассматривается метод лазерного зондирования – один из самых современных активных методов дистанционного зондирования окружающей среды. Разработанный в Национальной академии авиации KA-14 LIDAR (Light Detection and Ranging) был успешно испытан при обнаружении нефтяных загрязнений. На основе анализа спектров флуоресценции обнаруженных утечек нефти наблюдались отличительные особенности между спектрами образцов нефти, добываемой в различных зонах Апшеронского полуострова. С целью создания базы данных на основе спектров образцов нефти, принадлежащих различным нефтегазодобывающим компаниям, был проведен процесс калибровки KA-14 LIDAR, и с помощью устройства были измерены спектры флуоресценции отдельных образцов. База данных, которая будет создана на основе этих документов, может быть использована для определения того, к какой компании Апшеронского полуострова относится выявленная утечка нефти.

**Ключевые слова:** лазерное зондирование, LIDAR, флуоресценция, нефтяные загрязнения.

## Introduction

Rapid and reliable detection of oil leaks on the water surface is one of the most important issues in terms of Environmental Protection in the coastal zones of the seas. KA-14 LIDAR, developed at the National Aviation Academy with the financial support of the State Oil Company of Azerbaijan Republic, has been successfully applied in the detection of oil spills occurring on the surface of the Caspian Sea and Absheron Peninsula. The working principle of KA-14 LIDAR is based on laser-induced fluorescence (LIF) of oil spots [1-5]. Crude oil is a very broad and diverse class of substances and complex compounds of hydrocarbons, salts, amines, sulfur compounds, and metals. It is known that the main components of crude oil include carbon (83-87%), hydrogen (11-14%), oxygen (up to 3%), nitrogen (0,1-2%), sulfur (0,05-6%) and microelements - metals (<0,1%; more common metals: iron, nickel, copper and vanadium) [6-7]. The basis of fluorescence spectroscopy applied for oil measurement and identification its aromatic compounds and their derivatives, which are the source of fluorescence of oil. 25 – 75% of the total carbohydrate content of the oil is made up of aromatic carbohydrates, the main of which consists of dual compounds. These compounds consist of benzene, naphthalene, anthracene, phenanthrene, fluoranthene, benzpirole, and other polycyclic aromatic carbohydrates and their derivatives, as well as porphyrins, which form heavy metals. Fluorescence irradiation of crude oils depends on its chemical composition, the concentration of fluorophore, and physicochemical properties of the oil. The fluorescence spectrum has wavelengths greater than 260 nm, encompassing the ultraviolet and visible range of light, and is more noticeable in the spectral range of 270-500 nm [8-10].

Currently, there are 8 OGPC and 4 Joint ventures located in different zones of Absheron peninsula in the Republic of Azerbaijan. The calibration process of KA-14 LIDAR and spectra of some samples were presented in the presented work to measure the fluorescence spectra of the oil samples obtained at the different Oil-Gas Production Companies.

## Methodology

The calibration process of KA-14 LIDAR was carried out in the following sequence: Laser cooling system checked; The wavelength of the laser radiation (obtained from the Collimator and perceived by the telescope) was measured; Energy of laser pulses is measured;

Fluorescence spectra have been excited by the third harmonic's of the Nd: YAG laser ($\lambda$ =355nm). Parameters of excitation: the diameter of the laser beam is d=5mm (after collimation); pulse frequency $f$ = 20Hz; pulse duration is $\tau$ = 7ns.

As a reference in the measurements, oil stain artificially spilled on asphalt was taken and fluorescence spectra of oil stain were drawn by KA-14 LIDAR from different distances. In Figure 1, the results obtained from a distance of 50m and 120m are presented.

Spectra presented in Fig.1 were used from an average of 6 files, with 630 pulses in each.

Figure 2 presents separate integral spectra of oil, oil on asphalt, and asphalt. The spectrum of oil was obtained by the method of separation of the spectrum of oil on asphalt from the spectrum of oil on asphalt.

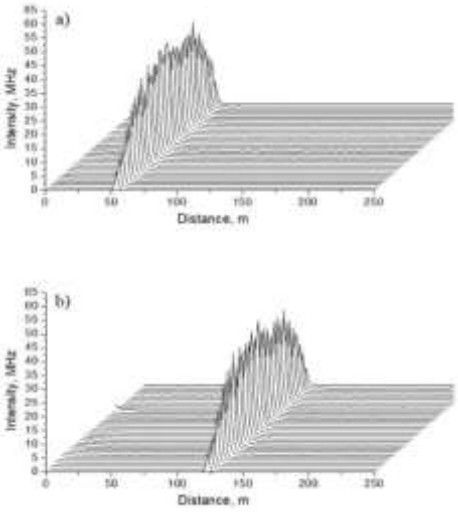



**Figure 1 –** Fluorescence spectra of oil stain sprinkled on asphalt from (spectra were detected by KA-14 LIDAR): a) 50m and b) 120m via KA-14 LIDAR

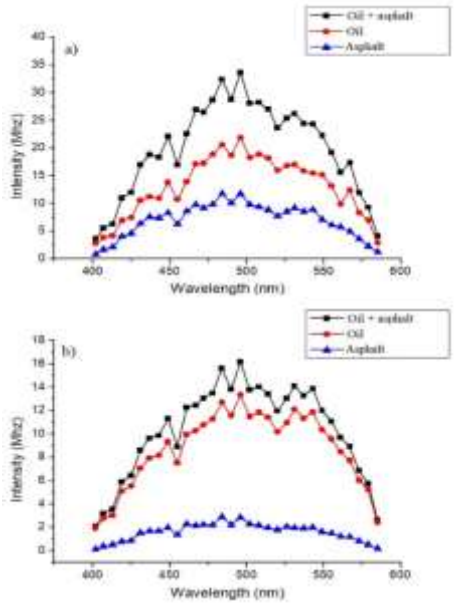



**Figure 2 –** Integral spectra of oil stain, oil and asphalt on asphalt a) 50m and b) 120m distance drawn

The experiment was carried out in the bright hours of the day on the territory of the National Aviation Academy. The energy of the laser was selected as E=10J and E=12J, respectively.

The results of the measurements made on the basis of calibration correspond to the results published in modern literature.

## Results

At the next stage, the fluorescence spectra of 7 different samples of oil belonging to Absheron Peninsula were measured.

Measurements were carried out in laboratory conditions, using KA-14 LIDAR in the following sequence:

- Firstly, background measurements were made in the closed state of the laser output;
- Secondly, the fluorescence spectrum of crude oil was measured;
- Finally, the background spectrum was recorded with the removal of the given object from the fluorescence spectrum.

The signal input time was 120 sec for all measurements. In Figure 3, fluorescence spectra of oil samples belonging to 7 OGPCs located on the Absheron peninsula were investigated.

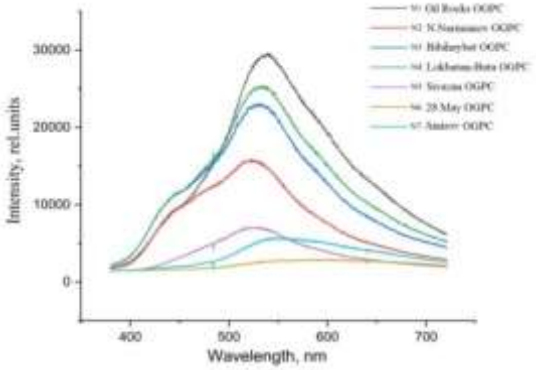



**Figure 3 –** Spectra of 7 different samples of crude oil belonging to SOCAR Oil-Gas Producing Companies by KA-14 LIDAR

The main differences between the fluorescence spectra of crude oil samples extracted from different zones are as follows:

- State of spectrum maximums of radiation;
- Presence of "shoulder" shaped bends on the sides of short and long waves;
- Width and shape of the irradiation strip.

## Conclusion

The results of measuerements carried out by means of calibrated KA-14 LIDAR confirm that the LIF spectra of crude oil obtained in different zones of the Azerbaijan Republic are different.

The creation of the database based on this feature will allow determinaton of which one of OGPCs belongs this lekage. It should be noted that currently, work is underway to measure Raman spectra of crude oil samples and to include these spectra in the database.

## Acknowledgments

This work was partly supported by the State Oil Company of Azerbaijan Republic and the author is gratefully thanks for this support. Author thanks also academician *A.M. Pashayev* and professor *K.R. Allahverdiyev* for supporting this research.

## REFERENCES

1. **Pashayev A.M., Tagiyev B.H., Allahverdiyev K.R., Musayev A.A., Sadikhov I.Z.** Water Research Proc. SPIE. 2015. V. 9810. Pp. 981018-1- 981018-7 *(in English)*
2. **Pashayev A.M., Tagiyev B.H., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** Book of Abstract, Intern. Conference Devoted to 10th Anniversary of Institute of Physical Problems of Baku State University, State Univ., Baku, December 25-16, 2015. Pp. 22-24 *(in English)*
3. **Pashayev A.M., Allahverdiyev K.R., Tagiyev B.G., Sadikhov I.Z.** Proc. SPIE. 2017. V. 10226. Pp. 102260W-1-102260W-6 (*in English)*
4. **Pashayev A.M., Tagiyev B.G., Veliyev N.A., Bagirov Y.M., Musayev A.A., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** *Azərbaycan Neft Təsərrüfatı Jurnalı*. 2018. No. 7-8. Pp. 67-71 (*in English)*
5. **Pashayev A.M., Musayev A.A., Veliyev N.A., Tagiyev B.G., Bagirov Y.M., Allahverdiyev K.R., Sadikhov I.Z.** Proceedings of MTP, BDU, Baku, 2019. Pp. 25-28. (*in English)*
6. **Əliyeva F.X., Sadıxova L.R., Quliyev C.A., Əcəmov K.Y., Hüseynova E.A.** Neft karbohidrogenləri ilə Xəzər dənizinin dib çöküntüsünün çirklənməsinin ekoloji monitorinqi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, cild 11, №4, s. 116-123 *(in Azerbaijani)*
7. **Petrov A.A.** Petroleum hydocarbons // Springer-Verlag, Berlin, 1984. 174 p. (*in English)*
8. **Samedova F.I.** Nefti Azerbajdzhana, Baku: *ELM* , 2011. 420 c. (*in Russian)*
9. **Pantoja P.A., Lopez-Gejo J., Le Roux G.A.C., Quina F.H., Naschimento C.A.O.** Energy Fuels. 2011. V. 25. No 8. Pp. 3598-3604 (*in English)*
10. **Shamirzaev V.T., Gaiser V.A., Shamirzaev T.S.** Bull. RAS. Physics. 2015. No. 2. V. 79. Pp. 165-168 (*in English)*
11. **Stelmaszewski A.** Application of fluorescence in studies of marine petroleum pollutants. Seszity Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni. 2012. Pp. 74-83 (*in English)*

# Non-Equilibrium Thermodynamics with Linear Modes in Tribocouplings (Part II)

**A.Kh. Janahmadov[1], D.Yu. Zhuravlev[2], V.N. Volchenko[3], V.T. Balonniy[4], V.Ya. Malyk[4]**

[1] *Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave., 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*
[2] *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)*
[3] *Kuban State Technological University (International Activities Support Department, Room A-523, 2, Moskovskaya st., Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)*
[4] *Drohobich College of Oil and Gas (Qrushevski str. 57, Drohobich, 82100, Ukraine)*

**For correspondence:**
Janahmadov Ahad / e-mail: dzhanakhmedov@yahoo.com

**Abstract**

An investigation of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes in tribocouplings of brake devices is carried out using Fourier's laws of thermal conductivity and Fick's effect, as well as the Sora and Dufour effects in relation to the flow of non-equilibrium processes of diffusion and thermal diffusion in the surface layers of friction linings. It is shown that there is an increase in the surface-volume temperature, which contributes to an increase in the volume of exit of endothermic reaction products from the upper layer of the polymer lining, as well as an increase in the equilibrium constant, which is accompanied by the release of heat. In this case, in accordance with the principle of van't Hoff's mobile equilibrium, elastic-plastic deformation of the microprotrusions of the working surface of the metal friction element occurs. A change in the degree of dispersity and compactness of the phases that appear in the upper layer of the polymer lining containing amorphous and vitreous substances significantly affects their chemical activity. The application of the Onsager reciprocity relation made it possible to determine the quantitative dependences between the diffusion and thermal diffusion parameters and their coefficients by calculation and experiment.

**Keywords:** braking device, friction pair, friction lining, diffusion and thermal diffusion, Onsager reciprocity relations.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_12_23

***Received*** *15.03.2022*
***Revised*** *20.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Janahmadov A.Kh., Zhuravlev D.Yu., Volchenko V.N., Balonniy V.T., Malyk V.Ya.*
[Non-equilibrium thermodynamics with linear modes in tribocouplings (Part II)]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 12-23 *(in English)*

# Triboqovşaqlarda xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikası (II hissə)

**Ə.X. Canəhmədov[1], D.Y. Juravlev[2], V.N. Volçenko[3], V.T. Balonnıy[4], V.Y. Malık[4]**

[1]*Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*
[2]*İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç.15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)*
[3]*Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)*
[4]*Droqobıç İxtisaslaşdırılmış Neft və Qaz Kolleci (Qruşevskiy küç. 57, Droqobıç, 82100, Ukrayna)*

**Yazışma üçün:**
Canəhmədov Əhəd / e-mail: dzhanakhmedov@yahoo.com

**Xülasə**

Məqalədə, əyləc qurğularının triboqovşaqlarında xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikasının tədqiqi Furye istilikkeçiricilik qanunundan və Fik effektindən, eləcə də friksion kündənin üst təbəqələrində diffuziya və termodiffuziya qeyri-tarazlıq proseslərinin axını ilə əlaqədar olan Sor və Dyufur effektlərindən istifadə etməklə aparılmışdır. Göstərilmişdir ki, polimer kündənin üst təbəqəsindən endotermik reaksiya məhsullarının çıxış həcminin artmasına kömək edən səthi-həcmi temperaturun, həmçinin istilik ayrılması ilə müşaiyət olunan tarazlıq sabitinin artması müşahidə olunur. Eyni zamanda, Vant Hoffun hərəkətli tarazlıq prinsipinə uyğun olaraq, metal sürtünmə elementinin işçi səthinin mikroçıxıntılarının struktur-plastik deformasiyası baş verir.

**Açar sözlər:** əyləc qurğuları, sürtünmə cütü, friksion kündə, diffuziya və termodiffuziya, Onsager qarşılıqlı nisbəti.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_12_23

**УДК:** 536 (075.8)

# Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжениях (часть II)

**А.Х. Джанахмедов[1], Д.Ю. Журавлев[2], В.Н. Вольченко[3], В.Т. Балонный[4], В.Я. Малык[4]**

[1] *Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)*
[2] *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)*
[3] *Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)*
[4] *Дрогобычский специализированный колледж нефти и газа (ул. Грушевского, 57, г. Дрогобыч, 82100, Украина)*

**Для переписки:**
Джанахмедов Ахад / e-mail: dzhanakhmedov@yahoo.com

**Аннотация**

Проводится исследование неравновесной термодинамики с линейными режимами в трибосопряжениях тормозных устройств с привлечением закона теплопроводности Фурье и эффекта Фика, а также эффектов Сора и Дюфура применительно к протеканию неравновесных процессов диффузии и термодиффузии в поверхностных слоях фрикционных накладок. Показано, что наблюдается увеличение поверхностно-объемной температуры, способствующей росту объема выхода продуктов эндотермических реакций из верхнего слоя полимерной накладки, а также константы равновесия, что сопровождается выделением теплоты. При этом в соответствии с принципом подвижного равновесия Вант-Гоффа происходит упругопластическая деформация микровыступов рабочей поверхности металлического элемента трения.

**Ключевые слова:** тормозное устройство, пара трения, фрикционная накладка, диффузия и термодиффузия, соотношения взаимности Онсагера.

**Introduction**

In tribology, three consecutive and interconnected friction process: frictional interaction of microprotrusions of rubbing surfaces, change in the properties of surface and near-surface layers as a result of interaction and destruction of surfaces due to the two previous stages. These stages of friction occur in the following fields: mechanical, electrical and electromagnetic. The driving force is the redox potential with its gradients. Its value is estimated for a polymer friction element in the longitudinal and transverse directions. For flows of the washing medium, the transverse temperature gradient is taken into account (determined by the ratio $C_p/C_V$; heat capacity at constant pressure to heat capacity at constant volume).

Any stable structural-phase state exists for a short period of time, passing to a new level of instability due to processes, phenomena and effects that increase the total entropy and, accordingly, reduce the free energy of materials. As a result, the next transition to a new quasi-stable state is provoked. In this case, the process continues for some time, which is determined by the physicochemical characteristics of the corresponding transformations, as well as the ability to create conditions under which these transitions will occur with the least possible frequency.

**Analysis of literary sources and the state of the problem**

Irreversible processes, phenomena and effects accompany the electrothermomechanical frictional interaction of brake friction pairs. The distinction between reversible and irreversible processes first entered thermodynamics through the concept of "entropy". The relationship between the irreversible processes occurring in tribocouples of friction pairs, between diffusion, thermal diffusion and thermal conductivity, on the one hand, and the rate of entropy increase, on the other.

Strongly non-equilibrium situations lead to new space-time structures. For this reason, the limitation of equilibrium situations, some essential features of the behavior of matter and energy. An example is the role of fluctuations. The atomic structure of matter leads to fluctuations. But at or near equilibrium, these fluctuations do not have any important consequences [1].

Indeed, a characteristic feature of equilibrium thermodynamics is the existence of principles of extrema. For isolated systems, entropy increases and therefore reaches a maximum at equilibrium. In other situations (for example, at a constant temperature) there are functions called thermodynamic potentials, which also have extrema (maxima and minima) in equilibrium [1]. The paper [2] gives an analysis and synthesis of thermoelectric processes characterizing electrothermomechanical frictional interacttions of friction pairs of brake devices. The upper layer of the polymer lining is isolated at temperatures above the allowable for its material, when the cracking process begins.

Thermokinetic models of the interaction of a metallic friction element during its operation in various media are considered. The influence of surface and bulk temperatures, specific loads, coefficient of mutual overlap of friction pairs, the ratio between the amount of reagents, the presence of inert gases and the type of reactions on the rate of chemical reactions during the cracking process in the upper layer of polymer linings of friction units of brake devices has been established. It is shown that when estimating the equilibrium of a

chemical reaction, it is necessary to take into account the change in the Gibbs energy.

Non-equilibrium tribology in friction friction pairs of brake devices is expressed in a continuous change in internal and external operational parameters in their surface and near-surface layers during electrothermomechanical friction [3].

The materials of work [4] refer to the testing technique used to study the processes of tribocracking of friction pairs. These processes are accompanied by the release of gas-vapor mixtures and water, which, at high temperatures exceeding the allowable for polymer lining materials, intensify the hydrogen wear of the working elements of friction pairs.

According to the results of studies of tribocracking of contact spots of microprotrusions of metal-polymer friction pairs, their energy load was estimated taking into account the redox processes occurring on the working surfaces. Regularities have been established for changing the dynamic coefficient of friction depending on the energy load of metal-polymer friction pairs exposed to electric, thermal and chemical fields. It is shown that tribocracking has a complex tribochemical nature with burnout of formaldehyde resin from the surface layer of the polymer lining. This process is accompanied by the release of water, hydrogen, oxygen and other gas mixtures.

In studies [1], it is noted that the adsorption effect, which is characterized by the number of grooves *N*, made in one of the friction elements of a direct or reverse friction pair, has a predominant role in the delivery of an active gas mixture. However, in the area between the grooves, the gas introduced from the outside due to the adsorbing effect is consumed when interacting with the friction surfaces, and a point (zone) may appear in which the active component of the gaseous medium is almost completely consumed, as a result of which the so-called gas starvation may occur [5]. A similar phenomenon can occur with the slit effect.

However, in the considered works [1-5], no attention was paid to diffusion and thermal diffusion processes, as well as the Onsager reciprocity relations as applied to triboconjugations of friction pairs of brake devices.

**Formulation of the problem**

The main issues of the article: general principles of energy processes in the fields of frictional interaction of friction pairs of brake devices; diffusion and thermal diffusion in tribocouplings; the discussion of the results.

**Objective** – substantiation of the possibility of using non-equilibrium thermodynamics with linear regimes in tribo-couplings of friction pairs of brakes.

**General principles of energy processes in the fields of frictional interaction of friction pairs of braking devices**

To clarify the meaning of the totality of concepts, we consider each type of energy as a product of two quantities: intensity (factor of intensive property) and capacity (factor of extensive property). So, mechanical energy is determined by the value of $Fdl$, i.e., the product of the force and the increment of the path; electric - $Edq$, i.e., the product of emf. on the amount of electric charge carried; magnetic - $Bdl$, i.e., the product of magnetic induction and magnetization; volumetric - $PdV$; surface energy - $\sigma d\omega$, i.e., the product of surface tension and the change in surface area; potential - $mgdh$; kinetic – $(v^2/2)dm$; chemical - $\mu dn$, it

determines the change in the chemical potential over the thickness of the substance. Intensity factors are often combined under the general name of generalized forces, and the capacity factor is called the generalized path. So, in the case of mechanical energy, the magnitude of the force is a stress factor (just like $p$, $\sigma$, $\mu$, etc. in the corresponding types of energy), and the magnitude of the distance traveled (i.e. changes in $\upsilon$, $\omega$, $n$, etc.) shows the extent to which the action of force is manifested. Energy in general can be written as follows:

$$dU = TdS – (Xdx + Ydy + …), \quad (1)$$

where $X$, $Y$ …. – intensity factors; $x$, $y$ … - their respective capacitance factors. If we assume that $dx=dy=…=0$, those. the system is not subject to the action of any external forces, then equation (1) takes the form: $dU = TdS$. In this case, the friction pairs in the brake are open. The intensity factors are potentials ($T$ is the potential of thermal energy; $\mu$ is the potential of chemical energy, etc.), i.e. voltages of the acting type of energy.

Every time two systems with different potentials interact, potential equalization occurs by changing the corresponding capacitance factors. So, pressure is equalized due to a change in volume, temperature - due to a change in entropy, etc.

Value $(\partial u / \partial n_i)_{V,S,n_j}$ is the chemical potential ($\mu_i$). This is true for the case when the internal energy of the liquid phase of the tribosystem increases with a decrease in the mass of the surface and near-surface layer of the polymer lining during the cracking process by unity at constant entropy, and the volume and masses of the lining components are variable. The heat flow is the driving force in heat transfer, and the chemical potential is the driving force in the phase transition of the mass of the upper layer of the polymer lining. The phase transition leads to the establishment of chemical equilibrium (and phase transition, if the mass decrease occurs in a heterogeneous system, i.e. between phases). Like other intensity factors in the cracking process, the chemical potential of the substances levels off as the process proceeds. At the moment of equilibrium, it becomes the same in all existing phases in which the components of the upper layer of the polymer lining are located. Thus, the chemical variable is the amount of lining components interacting with the material of the metallic friction element. Unlike other intensity factors, it is impossible to directly measure the chemical potential, which makes this concept not as clear as, for example, specific load, surface and bulk temperatures, etc. Below are equations describing an infinitesimal change $U$, $H$, $F$ and $G$ for a phase whose mass and concentration may change as a result of exchange with other phases.

If we assume that during frictional interaction only specific loads act on the tribosystem, then with independent variables $S$, $V$ and $n_1$, $n_2$, $n_3$ ... we obtain the equation:

$$dU = TdS – PdV + \sum \mu_i dn_i. \quad (2)$$

With independent variables $S$, $P$ and $n_1$, $n_2$, $n_3$ ... we have:

$$dH = TdS – VdP + \sum \mu_i dn_i. \quad (3)$$

Applying $T$, $V$ and $n_1$, $n_2$, $n_3$ ... as variables, we have:

$$dF = - SdT – PdV + \sum \mu_i dn_i. \quad (4)$$

Finally, with independent variables $P$, $T$ and $n_1$, $n_2$, $n_3$ ... we have:

$$dG = -SdT - VdP + \sum \mu_i dn_i. \quad (5)$$

Taking partial derivatives from equations (2)-(5), we obtain analytical expressions for various thermodynamic parameters. In addition, these expressions imply:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial u}{\partial n_i}\right)_{V,S,n_j} = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{P,S,n_j} = \quad (6)$$
$$= (\partial F/\partial n_i)_{V,T,n_j} = (\partial G/\partial n_i)_{P,T,n_j},$$

those, the chemical potential of the upper layer of the working surface of the polymer lining during frictional interaction with a metal friction element is equal to the partial derivative of any thermodynamic potential of a given phase with respect to the number of moles of this component, provided that the corresponding thermodynamic parameters and the number of moles of the remaining components of the lining remain constant. In other words, the chemical potential is a partial molar value of the thermodynamic potential, provided that the corresponding parameters of the state of the tribosystem remain unchanged.

**Diffusion and thermal diffusion in tribocouplings**

Diffusion and thermal diffusion flows of liquid, vapor and gas play a significant role in the equilibrium state of tribocouples of friction pairs of braking devices.

On fig. 1 shows the algorithm of non-equilibrium thermodynamics in tribo-arrangements of friction pairs of brakes.

In table 1 shows the laws and effects as applied to diffusion and thermal diffusion in tribocouplings. As for chemical reactions, the material on them will be placed in the third part of the article.

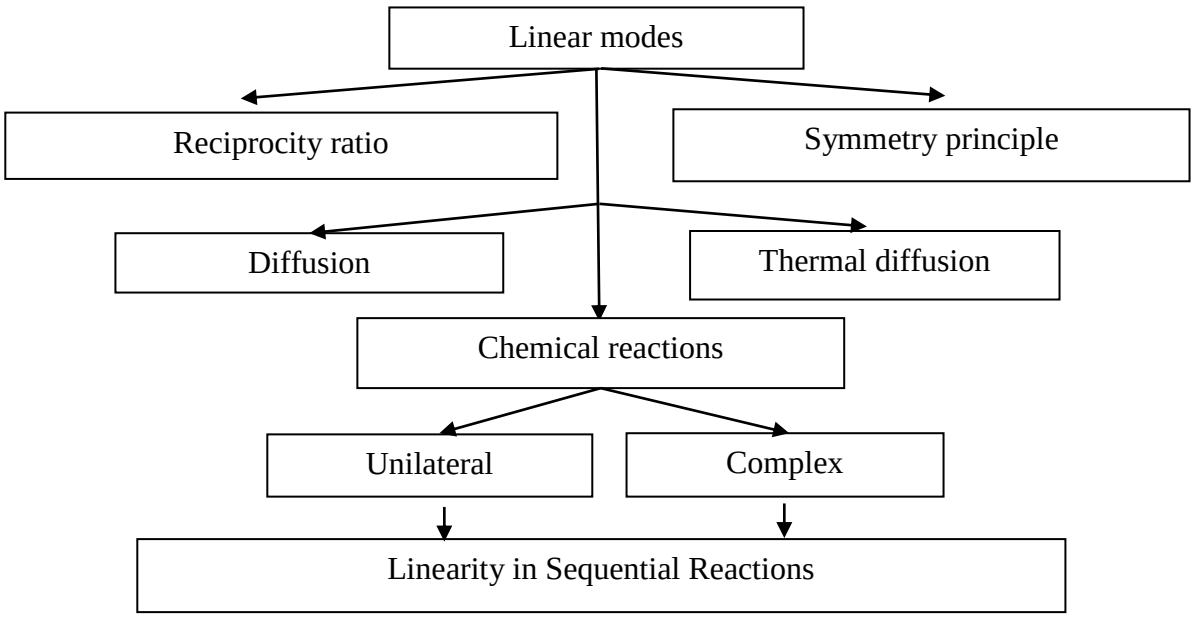



**Figure 1 –** Algorithm of nonequilibrium thermodynamics with linear regimes in tribocouplings

**Table 1 –** Laws and effects accompanying diffusion and thermal diffusion in tribocouplings

| Laws and effects | |
|---|---|
| N a m e | C o n t e n t |
| Fourier's law of heat conduction | Establishes a relationship between the temperature gradient of the medium and the heat flux density. |
| Fick's Laws:<br>first<br><br>second | <br>Sets the proportionality of the diffusion flow of liquids and gases to their concentration gradient.<br>It is characterized by the diffusion equation at its constant value. |
| Effects:<br>Soret<br>Dufour | <br>The flow of heat generates a flow of liquid and gases.<br>The mixing of liquid and gases contributes to the release of heat |

When solving this problem, we apply the theory of linear nonequilibrium thermodynamics to the diffusion process. Depending on the energy load of the working layer of the polymer lining, a weak and strong electrolyte forms on its surface when the formaldehyde resin burns out [4].

In the region of low concentrations, the concentration increases with increasing concentration (since the number of ions in 1 cm3 of solution increases with increasing concentration), reaches a maximum value, and then decreases. In solutions of strong electrolytes, this decrease is explained by a slowdown in the movement of ions due to the relaxation effect and the effect of electrophoretic braking, and in solutions of weak electrolytes, it is explained by a decrease in the degree of dissociation.

Consideration of the influence of the concentration of the solution on the value of $\lambda$ is more convenient to start with an analysis of the dependence of the equivalent electrical conductivity on the dilution of the solution (Fig. 2). Dilution (dilution) of a solution $V=1/C$ is the reciprocal of concentration $C$. As experiments show, with increasing dilution (decreasing concentration), the equivalent electrical conductivity increases and reaches a certain limit value, as shown in fig. 2. This limit value $\lambda$ is called the electrical conductivity at infinite dilution and is denoted $\lambda_\infty$.

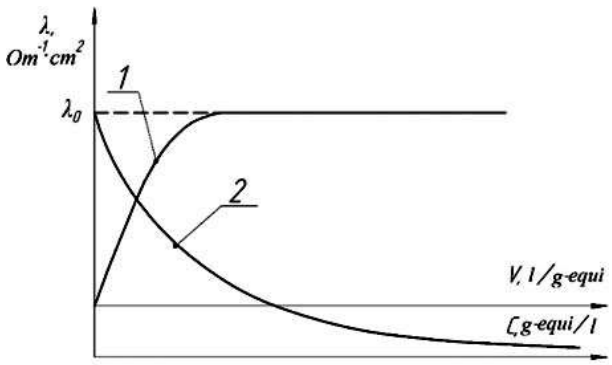



**Figure 2 –** Dependence of equivalent electrical conductivity λ on dilution (curve 1) and on solution concentration (curve 2)

When several components diffuse simultaneously from the surface layers of the FK-24A lining and the flow of one component affects the flow of another. The entropy production per volume unit due to multicomponent diffusion is:

$$S = -\sum_k J_k \cdot \nabla\left(\frac{\mu_k}{T}\right), \qquad (7)$$

where $J_k$ – flow of matter; $\mu_k$ – component chemical potential $k$ and his temperature $T$.

Under isothermal conditions, the corresponding linear relations have the form:

$$J_k = -\sum_k \frac{L_{ik}}{T} \nabla \mu_k . \quad (8)$$

The first task is to find a relationship between the linear coefficients $L_{ik}$ and the experimentally measured diffusion coefficients $D_{ik}$. For multicomponent diffusion (under isothermal conditions), the "generalized Fick's law" can be represented as

$$J_i = -\sum_k D_{ik} \nabla n_k (x). \quad (9)$$

where $n_k(x)$ – component concentration $k$ at the point $x$; $D_{ik}$ – diffusion coefficients.

Having written down the dependences for a two-component and multi-component mixture, after performing a series of substitutions and transformations, we obtained the relationship between the coefficient $L_{11}$ and the diffusion coefficient

$$L_{11} = \frac{D_1 T}{\left(1 + \frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2}\right)\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial n_1}\right)}. \quad (10)$$

For the diffusion of a substance in a solution, $n_1$ and $n_2$ are the number of moles of the solvent and dissolved substance per unit volume, and for a dilute solution $\mu_1 = \mu_0(p,T) + RT \ln x_1$, where $R$ – gas constant; $p$ – pressure; $x_1 = n_1/(n_1 + n_2) \approx n_1/n_2$, and $n_1 << n_2$. These conditions simplify the relationship between $L_{11}$ and $D$:

$$L_{11} = \frac{D_1 n_1}{R}. \quad (11)$$

This formula establishes the relationship between the usual diffusion coefficient and the corresponding coefficient μ. To test the Onsager reciprocity relation, it is necessary to have at least three components in the system. For three-component isothermal diffusion, the entropy production per unit volume is

$$S = -\frac{J_1}{T} \cdot \nabla \mu_1 - \frac{J_2}{T} \cdot \nabla \mu_2 - \frac{J_3}{T} \cdot \nabla \mu_3 . \quad (12)$$

Let us write for the three-component system the Gibbs-Duhem equations and the condition of the absence of a volumetric flow

$$n_1 \nabla \mu_1 + n_2 \nabla \mu_2 + n_3 \nabla \mu_3 = 0; \quad (13)$$

$$J_1 \nu_1 + J_2 \nu_2 + J_3 \nu_3 = 0. \quad (14)$$

Let's pretend that $J_3$ and $\mu_3$ are solvent variables, and $J_1$, $\mu_1$; $J_2$, $\mu_2$ are variables of two solutes whose cross-diffusion is of interest. Using (13) and (14), $J_3$ and $\mu_3$ can be eliminated from the entropy production expression. The entropy production is then written only in terms of the two solute variables $J_1$, $\mu_1$ and $J_2$, $\mu_2$:

$$S = F_1 \cdot J_1 + F_2 \cdot J_2 . \quad (15)$$

where the thermodynamic forces $F_1$ and $F_2$ have the form

$$F_1 = -\frac{1}{T}\left[\nabla \mu_1 + \frac{n_1 \nu_1}{n_3 \nu_3} \nabla \mu_1 + \frac{n_2 \nu_2}{n_3 \nu_3} \nabla \mu_2\right]; \quad (16)$$

$$F_2 = -\frac{1}{T}\left[\nabla \mu_2 + \frac{n_2 \nu_2}{n_3 \nu_3} \nabla \mu_2 + \frac{n_1 \nu_1}{n_3 \nu_3} \nabla \mu_1\right]; \quad (17)$$

So let's write the ratios:

$$J_1 = L_{11} F_1 + L_{12} F_2 ; \quad (18)$$

$$J_2 = L_{21} F_1 + L_{22} F_2 . \quad (19)$$

To check the reciprocity relations, it is necessary to relate $L_{ik}$ and the experimentally measured diffusion coefficients $D_{ik}$ of the generalized Fick law:

$$J_1 = -D_{11} \nabla n_1 - D_{12} \nabla n_2 ; \quad (20)$$

$$J_2 = -D_{21} \nabla n_1 - D_{22} \nabla n_2 . \quad (21)$$

It should be noted that for $J_2$ =0 these equations lead to the fact that the constant

flow $J_1$=const associated with the concentration gradient $n_1$ causes the concentration gradient $n_2$. Let us continue that fluxes and concentration gradients are directed along the same direction, say $x$, so that all gradients correspond to derivatives with respect to $x$. Since the chemical potentials $\mu_k$ are functions of $n_k$, one can represent the forces $F_k$ in terms of the concentration gradients of the two diffusing components. Thus, we get

$$\frac{\partial \mu_1}{\partial x} = \frac{\partial \mu_1}{\partial n_1}\frac{\partial n_1}{\partial x} + \frac{\partial \mu_1}{\partial n_2}\frac{\partial n_2}{\partial x}. \quad (22)$$

We write a similar relation for the gradient $\mu_2$. Using these relations in (16) and (17) and substituting them into (18) and (19), we write the fluxes $J_k$ in terms of the gradients $n_k$. After calculations, the following relations between the diffusion coefficients and linear Onsager coefficients are obtained:

$$L_{11} = \frac{dD_{11} - bD_{12}}{ad - bc}, \quad L_{12} = \frac{aD_{12} - cD_{11}}{ad - bc} \quad (23)$$

$$L_{21} = \frac{dD_{21} - bD_{22}}{ad - bc}, \quad L_{22} = \frac{aD_{22} - cD_{21}}{ad - bc} \quad (24)$$

where a, b, c, d are coefficients.

Obviously, the meaning of the reciprocity relations $L_{12} = L_{21}$ is reduced to the following:

$$aD_{12} + bD_{22} = cD_{11} + dD_{21}. \quad (25)$$

The results of experimental studies of changes in the amount and composition of the gas-vapor mixture formed in the intercontact space of friction pairs indicate that the friction process is of a complex tribochemical nature (Table 2) [4].

The amount of water that ended up in the measuring tube of the vacuum pump was 35.4 ml.

Experimental and calculated data of the multicomponent system are given in Table 3.

**Table 2 –** The percentage ratio of the components of the gas mixture formed in the intercontact space of the friction pair steel 30KhGSA - FK-24A

| Sample number | Composite brand | Temperature, °C | Gas content, wt. share, % | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $H_2$ | $O_2$ | $N_2$ | $CO_2$ | CO | $\Sigma C_nH_m$ | Other gases *** |
| 1 | ФК-24А | 150 | * | 19,8 | 78,8 | 0,28 | * | * | |
| 2 | - | 215 | * | 19,8 | 78,8 | 0,23 | * | * | |
| 3** | - | 420 | 0,123 | 19.1 | 79,5 | 0,13 | * | * | Rest |
| 4** | - | 500 | 0,171 | 16,3 | 81,6 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | |
| 5 | - | 750 | 0,308 | 9,8 | 81,2 | 0,08 | 0,08 | 1,06 | |

Note: *Presence of traces of specified gases; **Sampling was carried out from four zones (points) simultaneously; ***Others mean Ar, Ne, He, Kr, $N_2O$, Xe, $O_2$, Rn.

**Table 3 –** Experimental and calculated values of diffusion coefficients for a multicomponent friction lining in the temperature range and verification of relationships

| Sample number | Friction material | Temperature, °C | $X_1$ | $X_2$ | $D_{11}x10$, м²/с | $D_{12}x10$, м²/с | $D_{21}x10$, м²/с | $D_{22}x10$, м²/с | $L_{12}/L_{21}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ФК-24А | 150 | 0,25 | 0,50 | 1,848 | -0,063 | -0,052 | 1,797 | 1,052 |
| 2 | " | 215 | 0,26 | 0,03 | 1,570 | -0,077 | -0,012 | 1,606 | 0,980 |
| 3 | " | 420 | 0,70 | 0,15 | 2,132 | 0,051 | -0,071 | 2,062 | 0,942 |
| 4 | " | 500 | 0,15 | 0,70 | 1,853 | 0,049 | -0,068 | 1,841 | 0,915 |
| 5 | " | 730 | 0,25 | 0,75 | 1,79 | 0,043 | -0,07 | 1,80 | 1,1 |

*Note: before the line, the exponent near the number ten is equal to two, and after it, it is equal to minus three.

The relationship between chemical potentials and concentrations is not always known exactly, and reliable measurements of diffusion coefficients are quite difficult.

Nevertheless, it can be seen that, within the limits of experimental errors, the reciprocity relations hold very well. In thermal diffusion, the interaction between heat flows and liquid and gas causes two separate Soret and Dufour effects (see Table 1).

In this case, reciprocity relations can be obtained using the expression for the production of entropy during diffusion and heat conduction:

$$S = \left( J_u - \sum_{k=1}^{w} J_k \mu_k \right) \cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right) - \sum_{k=1}^{w} J_k \cdot \frac{1}{T} \nabla \mu_k \quad (26)$$

After complete separation of the temperature and concentration gradient, determination of the molar entropy under the condition of equalizing the specific loads in the tribocoupling and, using a series of transformations, an expression was obtained that determines the heat flux, taking into account the flow of liquid and gas

$$S = \left( J_u - \sum_{k=1}^{w} J_k (\mu_k + TS_k) \right) \cdot$$
$$\cdot \nabla \left( \frac{1}{T} \right) - \sum_{k=1}^{w} J_k \cdot \frac{1}{T} (\nabla \mu_k)_{p,T} \quad (27)$$

Now, using $G = H\text{-}TS$, it is easy to see that $\mu_k + TS_k = H_k$, where is the partial molar enthalpy $H_k = \left( \partial H / \partial n_k \right)_{p,T}$.

Using this definition, the heat flux, taking into account the flow of matter, can be defined as

$$J_q \equiv J_u - \sum_{k=1}^{w} H_k J_k . \quad (28)$$

In a closed system at constant volume, the change in enthalpy due to a change in composition is equal to the exchange of heat interacting with the external environment. In an open system with a fixed amount of heat, the difference between the changes in energy and enthalpy due to the flow of liquid and gas is determined. In what follows, the resulting expressions are associated with Fourier's heat conduction laws and Fick's diffusion laws, but in this case we write the gradients as

$\nabla \mu_1 = \left( \partial \mu_1 / \partial n_1 \right) \nabla n_1$ ;

$\nabla \left( 1/T \right) = -\left( 1/T^2 \right) \nabla T$ ,

so the two streams take the form:

$$J_q = -\frac{L_{qq}}{T^2} \nabla T - L_{q1} \frac{1}{T} \left( 1 + \frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2} \right) \frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} \nabla n_1 ; \quad (29)$$

$$J_1 = -\frac{L_{1q}}{T^2} \nabla T - L_{11} \frac{1}{T} \left( 1 + \frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2} \right) \frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} \nabla n_1 . \quad (30)$$

Now we determine the coefficients of diffusion and thermal conductivity

$$D_1 = L_{11} \frac{1}{T} \left( 1 + \frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2} \right) \frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} ; \qquad k = \frac{L_{qq}}{T^2} .$$

and get reciprocity relations

$$L_{q1} = L_{1q} . \quad (31)$$

Cross flow $-\left( L_{1q} / T^2 \right) \nabla T$ usually presented as $-n_1 D_T \nabla T$, wherein $D_T$ – thermal diffusion coefficient, so that the flow of matter is proportional to $n_1$. The ratio of the thermal diffusion coefficient to the ordinary diffusion coefficient is called the Soret coefficient.

$$s_T = \frac{D_T}{D_1} = \frac{L_{1q}}{D_1 T^2 n_1} . \quad (32)$$

In a closed system with a temperature gradient (Fig. 3), concentration gradients are established due to heat flows. Assuming $J_1$=0, one can obtain the stationary value of the concentration gradient

$$J_1 = -\frac{L_{1q}}{T^2} \nabla T - D_1 \nabla n_1 = 0 . \quad (33)$$

Insofar as $L_{1q}/T^2 = n_1 D_T$, we write the gradient ratio as follows:

$$\frac{\nabla n_1}{\nabla T} = -\frac{n_1 D_T}{D_1} = -n_1 s_T . \quad (34)$$

The Soret coefficient has units of $T^{-1}$. In the general case, it is small and ranges from $10^{-2}$ to $10^{-3}$ for electrolytes and gases [6-12], but in polymer solutions it can take larger values. The heat flux caused by the flow of matter is determined by the Dufour coefficient $D_d$. Since heat accompanies the flow of matter and is proportional to the concentration $n_1$, the Dufour coefficient is defined as

$$n_1 D_d = L_{q1} \frac{1}{T}\left(1+\frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2}\right)\frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} . \quad (35)$$

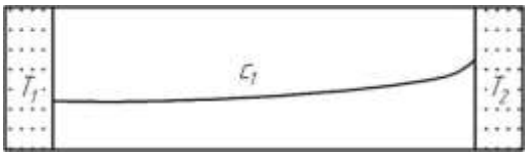



**Figure 3 –** Thermal diffusion. The temperature gradient and the resulting heat flux causes a concentration gradient in the incoming ($T_2$) and escaping ($T_1$) surfaces of the lining

Since, $L_{1q}/T^2 = n_1 D_T$ the Onsager reciprocity relation $L_{1q} = L_{q1}$ determines the ratio of the Dufour coefficient and to the thermal diffusion coefficient:

$$\frac{D_d}{D_T} = T\left(1+\frac{\nu_1 n_1}{\nu_2 n_2}\right)\frac{\partial \mu_1}{\partial n_1} . \quad (36)$$

This ratio has been confirmed experimentally. Thus, nonequilibrium thermodynamics is a generalized theory of irreversible processes. Onsager's reciprocity relations are general and valid for all systems in which linear relations hold.

## Conclusion

The study of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes in tribocouplers of brake devices using the laws of thermal conductivity of Fourier and Fick, as well as the Sor and Dufour effects in relation to the flow of equilibrium processes of diffusion and thermal diffusion in the surface layers of friction linings, made it possible to establish the following: the factors in the tribosystem are the potentials (T - the potential of thermal energy; p - the potential of the specific load; μ - the potential of chemical energy, etc.), i.e. the voltages of the acting type of energy, each time when two tribosystems with different potentials enter into interaction, there is an equalization of potentials due to a change in the corresponding capacitance factors. So, the pressure of gases is leveled off due to a change in volume, temperature - due to a change in entropy, etc.; an increase in the surface-volume temperature contributes to an increase in the volume of the output of endothermic reaction products from the upper layer of the polymer lining, as well as the equilibrium constant, which is accompanied by the release of heat. In this case, in accordance with the principle of van't Hoff's mobile equilibrium, elastic-plastic deformation of the microprotrusions of the working surface of the metal friction element occurs. A decrease in the surface temperature of friction pairs contributes to the intensification of the exothermic reaction with the dissociation of ions of the surface layer of the polymer lining; the electrons formed in the electrolyte are strongly oriented and their effective dipole moment is large, which leads to the inversion of many currents according to the "polymer-metal" scheme; triboadsorbed gas is adsorbed by the working surface of the metal, after which its chemical transformations occur; at the rate of tribosorption and triboreaction of the same order, the chemical reaction is shifted towards

the working surface of the metal friction element; a change in the degree of dispersity and compactness of the phases that appear in the upper layer of the polymer lining, containing amorphous and vitreous substances, significantly affects their chemical activity; in this case, it is necessary to take into account the change in the Gibbs energy; the change in the Gibbs energy of the surface layer of the polymer lining is associated with its temperature and heat content, which affect the direction of shifting the equilibrium of the chemical reaction; application of the Onsager reciprocity relation allowed to determine the quantitative dependences between the parameters of diffusion and thermal diffusion and their coefficients by calculation and experiment.

## REFERENCES

1. **Prigozhin I., Kondepudi D.** Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures (translation from English: Yu.A. Danilov and V.V. Bely). M.: *Mir,* 2002. - 461 p. *(in Russian)*
2. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Volchenko D.A.** [and others] Electrothermomechanical frictional interaction in friction pairs during the cracking process (part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, Baku, No. 3, 2020. S. 12-31 *(in English)*
3. **Zhuravlev D.Yu.** Thermodynamic limit of surface layers of polymer linings in frictional interaction. Kharkov: *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2014, No. 2 / 11 (68). S. 20-26 *(in English)*
4. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Skrypnyk V.S.** [and others]. Electrothermomechanical frictional interaction in friction pairs during the cracking process (part II). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, Baku, No. 4, 2020. S. 19-26 *(in English)*
5. **Belousov V.Ya., Chichinadze A.V., Bogatchuk I.M.** Wear resistance of friction polymer materials. Lvov: *Izd-vo pri Lvov. un-te,* 1989. - 144 p *(in English)*
6. **Zhuravlev D.Yu.** Non-equilibrium tribology in the frictional interaction of friction pairs of brake devices (part 1). *Problems of friction and wear,* No. 4, 2015. - Pp. 43-50 *(in English)*
7. **Zhuravlev D.Yu.** Non-equilibrium tribology in the frictional interaction of friction pairs of brake devices (part 2). *Problems of friction and wear*, No. 1, 2016. - Pp. 33-45 *(in English)*
8. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Zhuravlev D.Yu. [i dr.]** Proektnyj i proverochnyj raschet frikcionnyh uzlov lentochno-kolodochnyh tormozov burovyh lebedok. Baku: *Apostroff,* 2016. – 312 s. *(in English)*
9. **Eremin E.N.** Osnovy himicheskoj termodinamiki. M.: *Vysshaya shkola*, 1978. – 340 s. *(in Russian)*
10. **Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M.** Calculations of the thermal regime of solids. L.: *Energy,* 1976. - 352 p. *(in English)*
11. **Kindrachuk M.V., Volchenko D.A., Volchenko N.A., Stebeletskaya N.M., Voznyi A.V.** Influence of hydrogen on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units. mater. sci. 2017, 53, pp. 282-288. *(in English)*
12. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A.** [and others]. Tribology: friction, wear, lubrication. Baku: *"Apostrophe - A*", 2019. - 640 p. *(in English)*

# Flow of Electric Currents in Ohmic Contacts of Friction Couples of Braking Devices

**D.A. Volchenko[1], M.Y. Javadov[2], V.S. Skrypnyk[1], N.A. Volchenko[3], D.Yu. Zhuravlev[1]**

[1]*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Karpatska st. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)*
[2] *Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*
[3]*Kuban State University of Technology (Moskovskaya st. 2, bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)*

**For correspondence:**
Skrypnyk Vasily / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Abstract**

The paper exams the energy levels of contacts in the frictional interaction of metal-polymer and semiconductor materials; ohmic contact in the system: "metal-polymer" and "metal-semiconductor"; the analysis of results. In this case, the height of the potential barrier between their materials in the near-contact zone and in the "metal-semiconductor" interface with "n" and "p" types of conductivity was taken into account. The different degree of regulation of their surfaces that contribute to the concentration of charge carriers and dislocations of imperfections in the crystal lattice of materials. In this case, thermionic, field and thermal field emissions were formed, accompanied by emerging metal shunts. As for the Fermi energy level, it affects the surfaces in the middle and in the depth of the band gap, near the edge of the valence band, as well as the resulting shift at the edge of the conduction band. All of these factors were under the influence of impulse specific loads and energy load, which contributed to the generation of electric currents of various magnitudes and directions along with alternating thermal currents.

**Keywords:** friction pair, contact microprotrusions, electric and thermal currents, energy levels, polymeric and semiconductor materials.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_24_40

***Received*** *12.08.2021*
***Revised*** *16.09.2022*
***Accepted*** *22.09.2022*

**For citation:**
*Volchenko D.A., Javadov M.Y., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Zhuravlev D.Yu.*
[Flow of electric currents in ohmic contacts of friction couples of braking devices]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 24-40 *(in English)*

# Əyləc qurğularının sürtünmə cütündəki omik kontaktlarda elektrik cərəyan axını

**D.A. Volçenko[1], M.Y. Cavadov[2], V.S. Skrıpnık[1], N.A. Volçenko[3], D.Y. Juravlev[1]**

[1] *İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine )*
[2] *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*
[3] *Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti* **(***Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)*

**Yazışma üçün:**
Skrıpnık Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Xülasə**

Məqalədə metalpolimer və yarımkeçirici materialların friksion qarşılıqlı təsiri zamanı kontaktlarının enerji səviyyələri; sistemdə omik əlaqə: "metal-polimer" və "metal-yarımkeçirici" kimi məsələlər nəzərdən keçirilib. Bu zaman kontakt zonasında və “metal-yarımkeçirici” ilə “n” və “p” keçiricilik növlərinin keçid sərhəddində onların materialları arasındakı potensial maneənin hündürlüyü nəzərə alınıb. Onların səthlərinin tənzimlənməsinin müxtəlif dərəcəli olması yük daşıyıcılarının konsentrasiyasına və materialların kristal qəfəsindəki qüsurların dislokasiyasına kömək edir. Bu zaman yaranan metal şuntları ilə müşayiət olunan termelektron, sahə və termo-sahə emissiyaları meydana gəlir. Fermi enerji səviyyəsinə gəldikdə, o, qadağan olunmuş zonanın səthinin ortasına və dərinliyinə, valentlik zonasının kənarına yaxın səthlərə, həmçinin keçiricilik zonasının yerdəyişməsinə təsir edib. Bütün sadalanan amillər xüsusi impuls yüklərinin və enerji yüklənməsinin təsiri altında idi ki, bu da dəyişən istilik cərəyanının və müxtəlif kəmiyyət və istiqamətlərdə elektrik cərəyanının yaradılmasına kömək edir.

**Açar sözlər:** sürtünmə cütü, kontaktların mikro-çıxıntıları, elektrik və istilik cərəyanları.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_24_40

**УДК:** 621.315.592

# Протекание электрических токов в омических контактах пар трения тормозных устройств

**Д.А. Вольченко[1], М.Я. Джавадов[2], В.С. Скрыпнык[1], Н.А. Вольченко[3], Д.Ю. Журавлев[1]**

[1] *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)*
[2] *Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*
[3] *Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)*

**Для переписки:**
Скрыпнык Василий / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Аннотация**

Рассматриваются энергетические уровни контактов при фрикционном взаимодействии металлополимерных и полупроводниковых материалов; омический контакт в системе «металл-полимер» и «металл-полупроводник». При расчете учитывалась высота потенциального барьера между их материалами в приконтактной зоне и в переходной границе «металл-полупроводник» с «n» и «p» типами проводимости. Разная степень регулирования их поверхностей способствует концентрации носителей заряда и дислокациям несовершенств кристаллической решетки материалов. При этом образовывалась термоэлектронная, полевая и термополевая эмиссии, сопровождающиеся возникающими металлическими шунтами. Энергетический уровень Ферми воздействовал на поверхности посередине и в глубине запрещенной зоны, вблизи края валентной зоны, а также на сдвиге зоны проводимости. Все факторы находились под воздействием импульсных удельных нагрузок и энергонагруженности, что способствовало генерированию переменных тепловых токов и электрических токов различной величины и направлений.

**Ключевые слова**: пара трения, микровыступы контактов, электрические и тепловые токи, энергетические уровни, полимерные и полупроводниковые материалы.

## Introduction

*Kragelsky I.V.* formulated and introduced into consideration tribotechnology with sequential and interrelated friction processes, namely: frictional interaction of surface microprotrusions, changes in surface and near-surface layers as a result of interaction and destruction of surfaces due to the two previous stages [1]. All three stages friction occurs in the following fields: mechanical, electrical, thermal, chemical and electromagnetic. The driving force in the specified fields is local potential with its gradients, evaluated in a particular process, phenomenon and effect in the longitudinal and transverse directions in a metal friction element. As for the currents of the washing medium, they take into account the transverse temperature gradient (determined by the ratio $C_p/C_\upsilon$, i.e., the ratio of the heat capacity at constant pressure to the heat capacity at constant volume). In all processes, phenomena and effects, the main role is played by ohmic contact.

## Analysis of literary sources and the state of the problem

The paper [2] provides a review of literature data on the properties of ohmic metal-semiconductor contacts and the mechanism of current flow in them (thermionic emission, field emission, thermal field emission, as well as current flow through metal shunts). The theoretical dependences of the resistance of an ohmic contact on temperature and the concentration of charge carriers in a semiconductor were compared with experimental data for ohmic contacts to semiconductors of the $A^{II}B^{VI}$ (ZnSe, ZnO), $A^{III}B^{V}$ (GaN, AlN, InN, GaAs, GaP, InP), $A^{IV}$ (SiC, diamond) and a solid solution of these semiconductors. In ohmic contacts based on lightly doped semiconductors, the main current flow mechanism is thermionic emission, and the height of the «metal-semiconductor» potential barrier is most often 0,1–0,2 eV. In ohmic contacts based on lightly doped semiconductors, the current flows due to field emission, and the height of the «metal-semiconductor» potential barrier is approximately 0,3-0,5 eV. In alloyed In contacts to GaP and GaN, a current flow mechanism is manifested, which is not typical for Schottky diodes - current flow through metal shunts formed due to the deposition of metal atoms on dislocations or other imperfections in the semiconductor.

It is known that the resistance of ohmic contacts was determined from the dependence of the potential difference between several contacts on the distance between them [2]; from the dependence of the resistance of the "metal-semiconductor-metal" structure with two ohmic contacts on the thickness of the structure [3]; from the analysis of the characteristics of contacts of different diameters [4], as well as by the heat transfer line method [5].

Currently, research is being carried out on the dependence of the resistance of ohmic contacts on temperature, charge carrier concentration, band gap of a semiconductor, and so on, in order to establish the mechanism of current flow through an ohmic contact. Theoretically, both current flow mechanisms traditional for Schottky barriers (thermionic emission, thermal field emission, field emission) and other mechanisms (recombination, metal shunts) were considered. The current flow mechanism was determined from a comparison of experimental results with these theories. These

studies were carried out both for semiconductors $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^{V}$, $A^{IV}B^{IV}$, and for solid solutions based on them.

The resulting structures with zero ohmic resistance for direct and sinusoidal electric current [6].

As in the case of superconductivity, this fact is due to the exchange-correlation interaction of electrons, but its cause is different and consists in the polarization of the structure by the electric field, and not in the polarization of the lattice by Cooper pairs.

In [7], the electrophysical processes of real "metal-semiconductor" contacts are considered, in the near-contact semiconductor region in which an additional electric field of the contact potential difference (spot field) arises both between microsections with different heights of potential barriers on the contact surface, and between contact surface and adjacent to it, and free surfaces of the metal and semiconductor. Energy models of real metal-semiconductor contacts and current flow mechanisms based on the theory of thermionic emission have been developed.

The features of determining the electrophysical parameters of the peripheral region of the contact surface and measuring the existing electrophysical parameters of real "metal-semiconductor" contacts are presented.

In [8], the phenomenon of electronic switching of polymer film currents as a result of changing the boundary conditions at the metal-polymer interface was studied. It is shown that the transition of the polymer to a highly conductive state can be realized by spatial separation of the metal, in which the position of the electrochemical potential changes, from the region of the polymer film, in which the electrical switching occurs.

An explanation of the effect is proposed on the basis of an injection model for the appearance of conductivity in a metal-polymer-metal structure.

In the materials of the article, the types of contacts of microprotrusions of metal-polymer and semiconductor materials are given [9]. The latter are modified in the form of tablets into the working surface of polymer linings.

The energy levels of microcontacts of friction pairs are illustrated.

A critical review of the literature indicated what needs to be done:

- to evaluate the energy load of metal-polymer and metal-semiconductor contact spots of microprotrusions of friction pairs of brakes;
- generalize the dependence for calculating the main operational parameters of metal-semiconductor contacts;
- to show the role of metal shunts in the contact frictional interaction on the distribution of pulsed electric currents between the spots of microprotrusions of friction pairs.

**Formulation of the problem**

The main questions of the article: energy levels of contacts in the frictional interaction of metal-polymer and semiconductor materials; ohmic contact in the system: "metal-polymer" and "metal-semiconductor"; the discussion of the results.

**The purpose of the work** is to establish the patterns of change in pulsed electric currents in ohmic contacts "metal - semiconductor" during their contact-pulse frictional interaction in friction pairs of brake devices.

**Energy levels of contacts in the frictional interaction of metal-polymer and semiconductor materials**

In polymer overlays, composed of heterogeneous materials, there are amorphous and crystalline phases, a capture of a different kind occurs - at interphase boundaries. The accumulation of charges at the boundaries is due to the difference in the conductivities of the considered phases (the Maxwell-Wagner effect) [9, 10].

When such a material is electrified, the carriers will collect near a given interface or, vice versa, leave it, depending on which of the two conduction currents is greater: flowing to the charge boundary or leaving it. Differences in local conduction currents also lead to charge dissipation during the subsequent thermally stimulated discharge, since in this case the currents already flow in the opposite direction. For charge neutralization processes, the properties of the working surface of the metal friction element also play an important role. The relationship between the energy levels is determined by the frictional contact interaction of microprotrusions of friction pairs [4].

In table 1, in fig. 1 *a*, *b*, *c* conditionally shows the difference between ***neutral, ohmic*** and ***blocking contacts.***

Let us consider the cases of the appearance of neutral contacts on microprotrusions of metal-polymer friction pairs according to fig. 1 *a* and table 1.

The first case refers to the surface temperatures of the polymer lining, which are below the allowable values for its materials. According to the table 1 and fig. 1 and the work function of electrons and ions from the metallic and non-metallic friction elements is equal to each other.

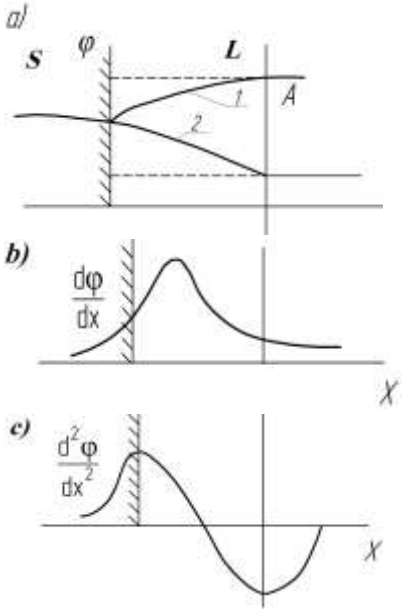



**Fig. 1 a, b, c. –** Dependence of the electrokinetic potential φ (a), field strength $E = d\varphi/dx$ (b) and charge density $\rho=d^2\varphi/dx^2$ (c) on the X coordinate: A – boundary of the fixed part of the electrical double layer; L - liquid; S is a solid body; curves 2 and 1 - respectively, up to the permissible temperature of the materials of the surface layer of the lining and above

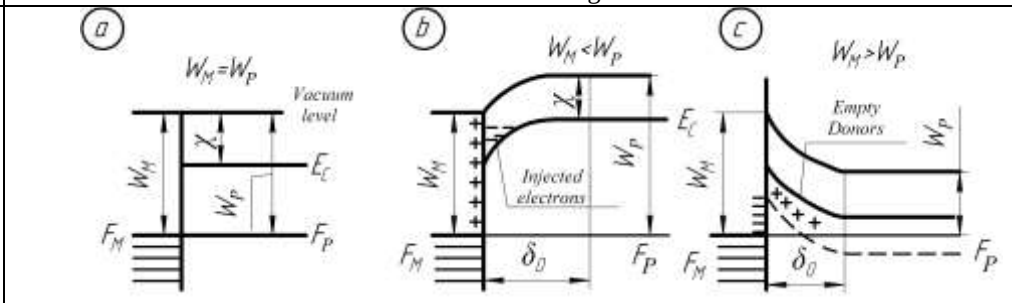
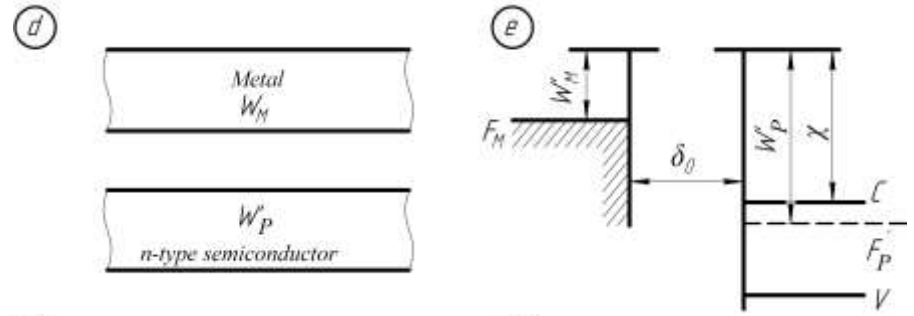
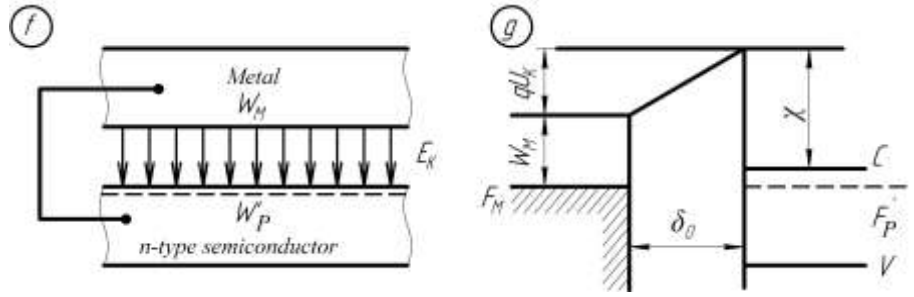
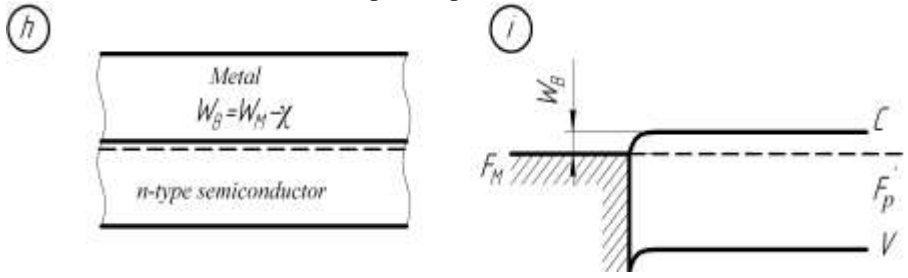
**Neutral contact**

A large increase in the work function of ions from the surface layer of the overlay is given by electron affinity. The latter is the ability of some atoms and molecules to attach an additional electron and turn into positive ions. The measure of electron affinity is the energy released in this case. Purposeful reorientation of electrons into ions makes it possible, due to this effect, to achieve equality of the work functions of particles.

Second case

When the working surface of the polymer lining reaches a temperature above the allowable for its materials, burnout occurs from the surface and near-surface layers of the binder components, which leads to the formation of liquid islands on the surface of the lining.

**Table 1 –** Energy diagrams during frictional interaction of microprotrusions of friction pairs "metal-polymer" (a, b, c) and "metal-semiconductor" (i) with n-type conductivity

| Name contacts | | Traditional | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Neutral | Blocking | Ohmic |
| Contacts of microprotrusions of friction pairs "metal-semiconductor" are disconnected (*d*) connected to an electric circuit (*f*) frictionally interact (*h*) | Work function of electrons and ions (*a, b, c, d, g, i*) |  | | |
| | | With semiconductor material | | |
| | |  | | |
| | |  | | |
| | | Straightening | | |
| | |  | | |

**Legend:** $\chi$ – electron affinity; $F_m$, $F_p$, $F'_p$ – Fermi levels: metal, polymer, semiconductor; $E_c$ is the energy of the formed capacitance of the capacitor ($C$); $\delta_0$ is the distance between microprotrusions; $U_k$ is the contact potential difference; $q$ is the electron charge; $W_f$ is the work function of electrons and ions from the rectifying contact; $V$ is the field voltage

When the working surface of a metal friction element comes into contact with a liquid, the transition of ions from the metal to the liquid is observed (Fig. 1a, curve 1).

In addition to the chemical mechanism of electrical phenomena in the contact of metal and liquid, another mechanism is also possible - electrification of the surfaces of metal and liquid during the movement of the latter, because the liquid layer, moving, carries away with itself an ionic charge. Calculations show that a significant accumulation of charges during the movement of a liquid occurs when its specific resistance is above 109 Ohm•cm. It is believed that in this case a double electric layer is formed on the surface of the metal in contact with the liquid.

The surface of the metal, as a result of the loss or capture of ions, acquires a certain chemical potential, and a certain charge is distributed over it. The opposite charge is in the liquid. The distribution of charges in a liquid can be characterized by a potential φ that varies with distance from the surface in accordance with the electrostatic forces and the Boltzmann distribution (Fig. 1*a*).

An analytical expression for calculating the value of the potential φ is obtained by solving the Poisson equation under the assumption of the existence of a screening double electric layer.

The metal enters the solution in the form of either positive ions or complex negative ions if it interacts with a liquid solution. In this case, the surface of the metal acquires a certain specific potential, which establishes a balance between the process of isolation and deposition of ions. This potential depends both on the nature of the metal and on the concentration of ions in the liquid. At a certain value of acidity (pH), the metal does not send ions into the solution, but, on the contrary, takes them from the solution, acquiring a charge before the onset of electrical equilibrium.

Metals are arranged in an electrochemical series with respect to the positive hydrogen ion $H^+$. When two different metals are immersed in a liquid, each of them has a certain potential with respect to the liquid.

When metals come into contact, an electric current arises until all metal ions or all ions of the solution are exhausted in the solution. Electric currents can also flow between different points of the same metal surface if it is charged and inhomogeneous.

**Blocking contact**

The behavior of the microprotrusions of the polymer lining is highly dependent on the material of the microprotrusions of the metallic friction element. Usually, the contact spots of microprotrusions covered with films are blocking contacts at low and intermediate field strengths (table 1, *c*).

Such a contact prevents the transfer of charge carriers from the electrode into the surface and near-surface layers of the polymer lining, while at the same time, it itself can receive carriers from these layers.

In a dielectric with blocking contacts, containing no charge carriers at all, the flow of a stationary current is obviously impossible. If in the dielectric there are carriers of both signs, and with very different values of their mobility, then near the contact spots of microprotrusions of a metal friction element, the sign of which coincides with the sign of more mobile carriers, a Schottky barrier is formed. The polarization of the contact patches of the microprotrusions of the lining arising under these conditions is due precisely to the presence of electrons. This situation is quite easily explained in the limiting case when there is no mobility of carriers of one

polarity (for example, electrons) and no further generation of free carriers occurs. The applied field in this case removes positive carriers from the contact spots of the microprotrusions of the lining (anodes), (located, say, at $x = 0$).

Since this electrode is not able to transfer positive charges to materials, a cloud of negative space charge with a density ρ is formed near it in a layer of thickness ss between the planes $x = 0$ and $x = s_s$. After the space charge layer has been fully formed, the voltage V, which initially fell across the entire thickness of the metal microprotrusion, will now become applied to layers of thickness $s_s$.

As a result, the current will go to zero. The length of the layer is determined by the formula $s_s = \sqrt{2\varepsilon V / \rho}$ and does not depend on the applied electric field.

For example, at a density of immobile (captured) carriers $\rho = 1 \cdot 10^{-4}$ *C/cm*, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-13}$ *F/cm* и $V = 1{,}0$ толщина слоя $s_s$ составляет $1{,}25 \cdot 10^{-3}$ cm. So, the use of blocking contacts prevents the complete removal of mobile carriers from the dielectric, and regardless of

The presence of a non-conductive interlayer of finite thickness between the dielectric and the electrode can cause the formation of barrier polarization.

True, the molecular dimensions of the resulting double layer of positive and negative carriers do not allow it to be detected in ordinary external measurements, for example, compensation charges on the electrode. In addition, the formation of a double electric layer does not give a blocking effect.

Thus, if the contacts are blocked, neutralization must take place inside the metallic friction element, regardless of the type of contact (whether it is injecting electrons or blocking). It depends only on which of the work functions of electrons or ions is greater: a metal or polymer friction element. If the work function of the first element is greater than that of the second element, a blocking barrier is formed. The presence of the latter makes it possible to study the method of thermally stimulated discharge of semi-insulators and semiconductors, which are characterized by large conduction currents. Blocking contacts act in the opposite way: they prevent both injection and neutralization of charges.

**Ohmic contact in the system "Metal - polymer"**

Most often, in metal-polymer friction pairs in relation to two-layer ("metal-polymer") structures of braking devices, an ohmic (injecting) contact is encountered (Table 1, *c*).

On fig. 2 shows the band diagram of the contact “metal - electrically conductive polymer”. A feature of this diagram is the presence of a narrow electrically conductive zone in the middle of the polymer gap. According to one of the hypotheses, just such a narrow band can be responsible for the transport properties of thin dielectric films.

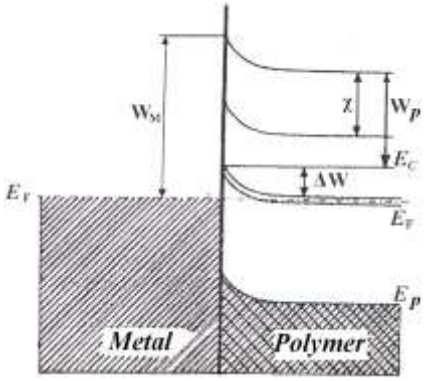



**Figure 2 –** Energy diagram of the friction pair "metal - polymer": $E_F$, $F_V$ - energy levels: metal (Fermi); polymer; $W_M$; $W_P$ - work function: electrons of their metal; ions and electrons from polymer; χ - electron affinity

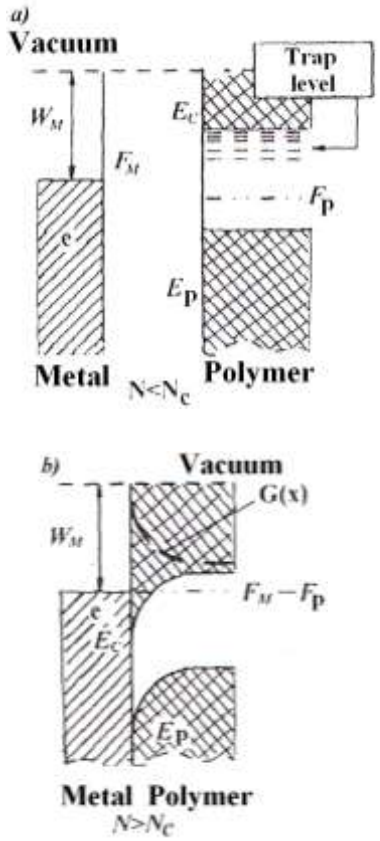



**Figure 3 a, b** – Qualitative picture of the energy bands in the "metal-polymer" system with pulsed normal forces acting on the polymer film: a – N < NC; b – N > NC; EC, EV are the energies of the zones: the conduction bottom and the valence top of the polymer; FM and FP are the Fermi and polymer levels; WM is the work function of an electron from a metal; dashed curve G(x) is the distribution of injected electrons in the polymer film

The change in the position of the Fermi level of a metal in the region of its phase transition relative to a narrow band in the polymer dictates the conditions for the injection of electrons and ions from the metal into the polymer and thus characterizes the change in the conductivity of the system as a whole.

On fig. 3 *a, b* shows the model of energy bands in the "metal-polymer" system stimulated by pulsed normal forces injection of current carriers from the metal into the conduction band of the polymer. According to this model, the compression of a polymer causes the decay of surface states that play the role of electron acceptors. It is also possible that, due to the increase in polarizability, the bottom of the conduction band of the polymer simultaneously decreases.

As a result, at a certain value of N=NC, the structure of the energy bands near the metal-polymer interface is favorable for carrier injection, although at N<NC this process either does not occur at all or has an extremely low efficiency.

With a decrease in the thickness of the polymer film, a situation may arise when the charges concentrated near the opposite boundaries of the considered contact begin to interact with each other, leading to a distortion of the shape of the potential barrier. The maximum film thickness at which the interaction of boundary charges begins can be considered to be twice the value of such a contact parameter as the penetration depth of the surface charge. The interaction of surface charges can lead to the formation of a local minimum in the middle of the barrier, which, in principle, can lead to the intersection of the curve describing the envelope of the potential barrier with the Fermi level (Table 2).

With such a hypothetical variant, new electronic states can arise in the middle of the barrier at the Fermi level, which increase its permeability for electrons. If we learn to control such states, then in fact it will mean the creation of a fundamentally new electronic hybrid nanostructured metal-polymer material.

If the contacts are blocked, neutralization must take place inside the metallic friction element, regardless of the type of contact (whether it is electron-injecting or blocking). It depends only on which of the work functions of electrons or ions is greater:

a metal or polymer friction element. If the work function of the first element is greater than that of the second, a blocking barrier is formed. The presence of the latter makes it possible to study the method of thermally stimulated discharge of semiconductors, which are characterized by large conduction currents.

Blocking contacts act in the opposite way: they prevent both injection and neutralization of charges.

In the case when the work function of the electrons and ions of the semiconductor $W_P$ is greater than the work function of the metal $W_M$ (Table 1, d, e), then when the metal and the n-type semiconductor are connected by a wire, the electrons pass from the metal to the semiconductor (Table 1, f). As a result, after the establishment of thermodynamic equilibrium, an electrostatic field $E_K$ is formed between them directed to the surface of the semiconductor, and a contact potential difference $U_K$ appears as shown in the energy diagram (Table 1, g).

The electric field between the metal and the semiconductor is created by the missing electrons on the surface of the metal and the excess electrons on the surface of the semiconductor. With a decrease in the thickness δ of the charge layer, naturally, the surface density of excess charges on the surfaces increases, as well as the electric field strength in the gap.

When the gap thickness decreases to the order of interatomic distances, i.e. in direct contact between a metal and a semiconductor, the surface atomic layer of the metal and the semiconductor forms a single quantum mechanical system (Table 1, h) and there is practically no potential barrier at the interface for free electrons (Table 1, i).

Thus, the contact of a metal with an n-type semiconductor has a potential barrier, i.e. has rectifying properties if $W_M > W'_S$ and - ohmic if $W_M \leq W'_s$ (Fig.4).

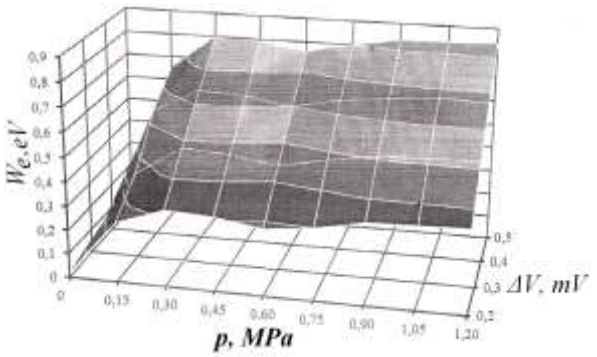



**Figure 4 –** Patterns of the work function of electrons from the working surfaces of friction pairs of the brake ($W_e$) on specific loads (p) at various values of the contact potential difference (ΔV) during frictional interaction

In the case when the metal is in contact with *p*-type zinc, the "metal-semiconductor" contact has rectifying properties if $W_M < W'_s$, and ohmic if $W_M \geq W'_s$ (Fig. 1 a, b, c). It should be noted that if the contact of a metal with an *n*-type and *p*-type semiconductor has the corresponding barrier heights $F_{Vp}$ and $F_{Vr}$, then their sum becomes equal to the band gap of this semiconductor $F_D$.

The initial data for calculating the mechanical and electrical parameters of the contact spot of microprotrusions for determining the current are the characteristics of the surface microgeometry - the maximum height of the protrusions above the middle line of the profile Rp and the maximum radius of the protrusions rmax; physical and mechanical characteristics of the material - the modulus of elasticity (Young's modulus) E, Poisson's ratio μ, electrical resistivity of the material r; operational characteristics, impulsive normal force compressing the contact.

**Table 2 –** Dependence of the potential difference in the contact on the difference between the Fermi levels of friction pair materials

| $F_1$-$F_2$, eV | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ΔV, мV | 0,09 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,31 | 0,34 | 0,38 | 0,41 | 0,44 | 0,47 | 0,50 |

**Table 3 –** Mechanical and electrical characteristics of the contact patch of two spherical microprotrusions of metal-polymer friction pairs

| Parameter name | | Estimated dependency |
|---|---|---|
| Radius of a single contact patch | | $a=(0{,}75Nr/E)^{2/3};$ (1) |
| Deformation of contacting micro-protrusions | | $\delta=\frac{a^2}{r}=\left[\left(0{,}56N^2/\left(rE^2\right)\right)\right]^{0{,}25};$ (2) |
| Specific load on the contact patch of microprotrusions | maximum | $P_1=\left(\frac{6NE^2}{\pi^2a^2}\right)=1{,}5N/\left(\pi a^2\right);$ (3) |
| | average | $P_2=0{,}66P_1=N/\left(\pi a^2\right);$ (4) |
| Reduced Young's modulus | | $1/E=\left(1-\mu_1^2\right)/E_1+\left(1-\mu_2^2\right)/E_2.$ (5) |
| Current strength | | $I=\sqrt{\frac{t_{\max}\cdot\alpha_T\cdot l_k}{R_k\cdot\rho}}.$ (6) |

In table 3 shows the main dependences for calculating the characteristics of a single contact of two spherical microprotrusions of the contact patch. In table 3, depending on 6, the following conventions are used: $t_{max}$ – maximum temperature at the contact patch of microprotrusions, ˚C; αT – external heat transfer coefficient, W/(m2 •˚C); Rk – contact thermal resistance, ˚C/W; ρ – electrical resistivity, (Ohm•mm2)/m; lk – contact length, mm.

The computer model is practically implemented as a Windows application, written in C++ using the Borland class library. Programmatically, the model is included in the main calculation module, which includes an assessment of the external and internal parameters of metal-polymer friction pairs at the macro-, micro- and nanolevels. In addition to the main one, there is an additional module responsible for the convenience of data presentation and user interface.

For greater clarity, on the basis of the proposed formulas, it is possible to build graphs of the dependences of the contact characteristics on external factors, which are the currents of the washing air and mixture components. Within the framework of the computer model, the contact characteristics are calculated as follows. A pair of random numbers is generated, distributed according to a given law, corresponding to the height and radius of the protrusion of a rough surface. The logic of the program is illustrated by a block diagram of the main calculation module for the parameters of mechanical, electrical and thermal fields (Fig. 5).

The program is connected to the MS Access database, which consists of two tables, each of which includes 33 fields. The first table contains the values of the initial and

intermediate data, and the second table contains the values of the results. Tables are used to build graphs.

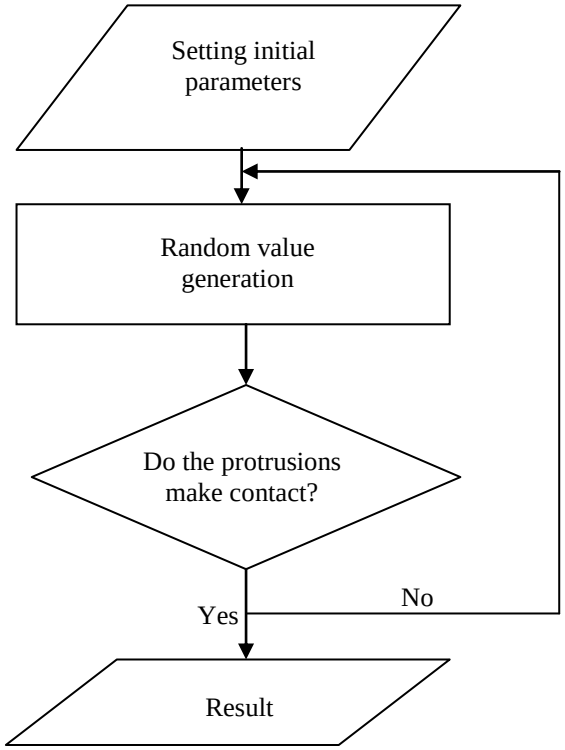



**Figure 5 –** Block diagram of the main calculation module

In this case, the first field of each table is reserved for the verified initial combination of initial parameters and is used only at the beginning of work and only for reading. First of all, the program reads the initial combination of initial parameters from the database and supplements the initial data fields with these values.

The user then edits them, executes calculation, after which the table of values is filled in and a graph is built on it. The adequacy of the model was checked by comparing the simulation results with the data of other authors, obtained on the basis of analytical models for some special cases [11, 12].

**"Metal is a semiconductor"**

The "metal-semiconductor" contact, which has both ohmic and rectifying properties, is the main multifunctional physical element of the contact patches of microprotrusions of friction pairs of brake devices.

In metallic and non-metallic friction elements of brake devices, semiconductor components are contained in the material structures. On fig. 6 shows the components of the resistance of the ohmic contact "metal - semiconductor".

The resistance of the near-contact region is the resistance of the heavily doped region and the resistance of the $n - n^+$ and $p - p^+$ transitions. The resistance of a heavily doped near-contact region is usually low in semiconductors with high carrier mobility. For example, the resistance of the near-contact layer $n^+$ - GaAs with a thickness of~1 μm at an electron density of $n^+ \approx 10^{19}$ $cm^{-3}$ and a mobility of ~ $10^3$ $cm^2/(V \cdot s)$ is about $6 \cdot 10^{-8}$ $Ohm \cdot cm^2$. At the same time, in semiconductors such as SiC and $A^{II}B^{VI}$, it is often impossible to achieve a strong doping of the near-contact region, and, moreover, the charge carrier mobility is low 10 – 100 $cm^2/(V \cdot s)$). In this case, the resistance of the near-contact region can reach ~ $10^{-4}$ - $10^{-5}$ $Ohm \cdot cm^2$. Consider the resistance of transitions n - n+, p - p + using the example of n+ - n -transition. It is inversely proportional to the electron concentration [13, 14].

Calculated dependence of the resistance of an ohmic contact on the concentration of charge carriers and the height of the metal-semiconductor potential barrier when field emission is the main mechanism of current flow. To reduce the resistance of the ohmic contact in such contacts, the height of the

metal-semiconductor potential barrier is reduced due to changes in the chemical composition of the semiconductor in its near-surface region.

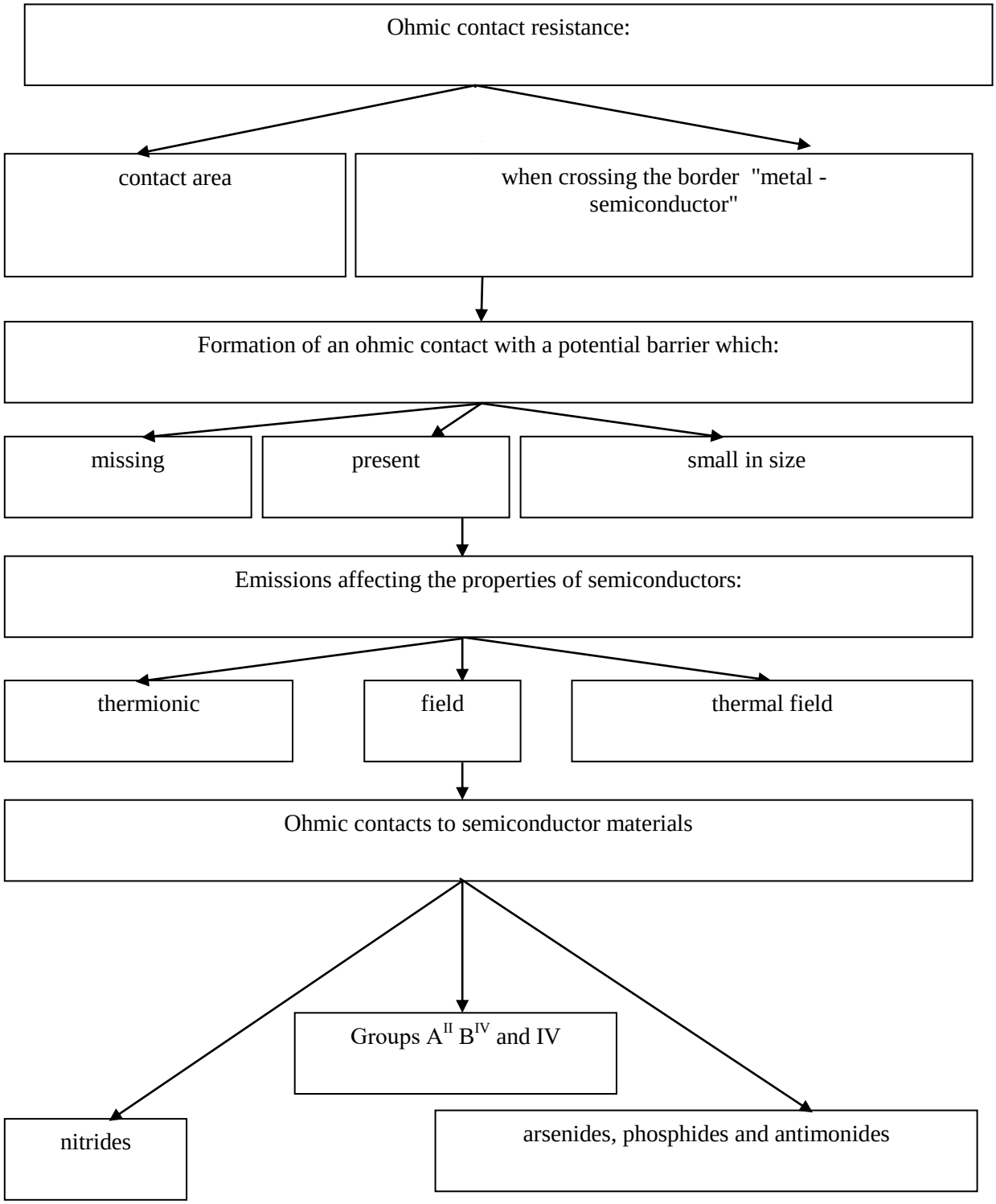



**Figure 6 –** Methods of current flow in ohmic contacts in the "metal-semiconductor" system

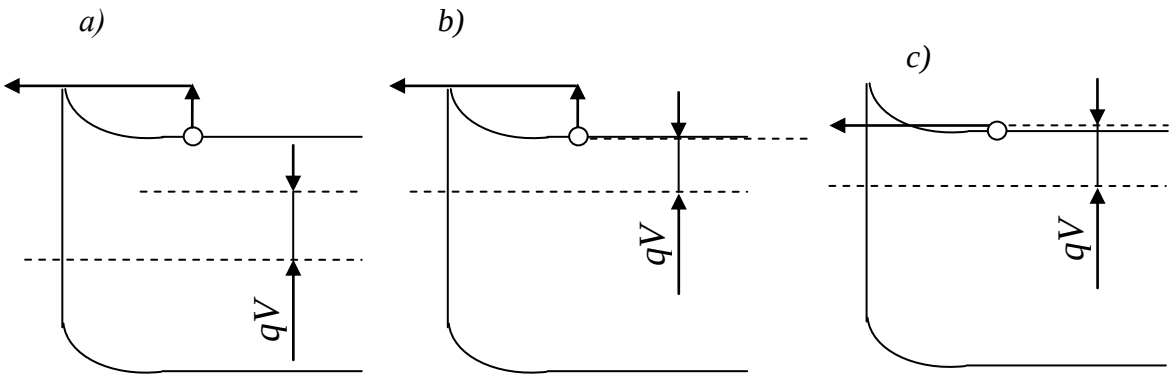



**Figure 7** – Methods of current flow in an ohmic metal-semiconductor contact: a – thermionic emission of electrons over the barrier; b – thermal field emission of electrons through the top of the barrier; c - tunneling (field emission) of electrons through the barrier

For the case of a p-type semiconductor, Nd is replaced by Na, the concentration of ionized acceptors in the semiconductor; Is – saturation current, n – coefficient of ideality of current-voltage characteristic, φb – potential barrier height, Δφb – reduction of potential barrier height by mirror image forces and other reasons; S is the contact area; T(E) is the probability of passing a carrier having energy E through a barrier less than qφb by ΔE; E00 is the Padovani-Stratton parameter [15], Vd is the diffusion (contact) potential difference. The transition of the metal-semiconductor interface by electrons can occur:

- above the barrier (thermionic emission, Fig. 7 a);

- through the top of the barrier (thermal field emission, Fig. 7b);

- through the barrier at the Fermi energy level (tunneling, field emission, Fig. 7c).

To determine the conditions under which one or another mechanism of current flow manifests itself.

*Padovani* and *Straton* [15] introduced the parameter E00, which depends on the nature of the semiconductor and the degree of its doping.

For clarity, we systematize the calculated dependences (7)-(17) borrowed from [1], where $L_D$ is the Debye length in the *n*-region, $N_c$ is the density of state in the semiconductor conduction band, μn is the electron mobility in the *n*-region, $N$ and $N^+$ - electron concentration in *n* and $n^+$ - regions, $K$ - coefficient showing how many times the concentration of electrons at the Fermi level in $n^+$ - region exceeds $N$, $q$ - electron charge.

For an ohmic contact to GaAs, it makes the main contribution to the contact resistance at $N < 5 \cdot 10^{17}$ cm$^{-3}$; $\chi$ is the Fermi level energy, $A^* = 4\pi q m^* k^2 h^{-3} = 120m$, A/(cm$^2$K$^2$) is the effective Richardson constant, $m_r = m^*/m_0$, $m_0$ is the free electron mass, $k$ is the Boltzmann constant, $\varepsilon_s$ is the permittivity of the semiconductor; $\varepsilon_0$ is the vacuum permittivity; $N_d$ is the concentration of ionized donors in the semiconductor. For the case of a *p*-type semiconductor, $N_d$ is replaced by $N_a$, the concentration of ionized acceptors in the semiconductor; $I_s$ – saturation current, $n$ – coefficient of ideality of current-voltage characteristic, $\varphi_b$ – potential barrier height, $\Delta\varphi_b$ – reduction of potential barrier height by mirror image forces and other reasons; $S$ is the contact area; T(E) is the probability of passing a carrier having energy $E$ through a barrier less than $q\varphi_b$ by $\Delta E$; $E_{00}$ is the Padovani-

Stratton parameter [15], $V_d$ is the diffusion (contact) potential difference.

Let's analyze dependences according to tabl. 4 concerning different types of emissions. If the current flow through an ohmic contact is determined by thermionic emission, then:

- the contact resistance increases exponentially with the height of the potential barrier $\varphi_b$;

- the contact resistance decreases with increasing temperature, and the dependence $R_cT = f(1/T)$ on a semi-logarithmic scale should be linear, and its slope is proportional to the barrier height $\varphi_b$, and the cutoff at $1/T \to 0$ is proportional to A*;

- contact resistance depends on the type of semiconductor and decreases slightly with increasing doping level $(\Delta\varphi \propto N_d^{1/4})$. If the current flow through an ohmic contact is determined by field emission, then: the contact resistance will increase exponentially with the height of the potential barrier; contact resistance is practically independent of temperature.

**Table 4 –** Calculation dependences for determining the operational parameters of ohmic contacts "metal - semiconductor"

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ohmic contact resistance | Contact area | | | $R_{n-n^+} \approx \frac{L_D N_c}{q\mu_n KNN^+}$ | (7) |
| | | | | $R_{n-n^+} = \left(\frac{k}{qA^*T}\right)\frac{1}{\ln\left[1+\exp\left(\chi/kT\right)\right]}$ | (8) |
| | | | | $R_{n-n^+} = \left(\frac{kN_c}{qA^*TN}\right)$ | (9) |
| | Associated with the transition of the border "metal - semi-conductor" | | | $E_{00} = \frac{h}{2}\sqrt{\frac{N_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0 m^*}},$ | (10) |
| I s s u e s | Thermionic | Parameters: | $J$ | $J = J_s \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right),$ | (11) |
| | | | $R_c$ | $R_c = \left(\frac{k}{qA\cdot T}\right)\exp\left[\frac{-q(\varphi_b - \Delta\varphi_b)}{kT}\right]$ | (12) |
| | Field | | T | $T(E) \propto \exp\left[\frac{-2(\Delta E)^{3/2}}{3E_{00}V_d^{1/2}}\right]$ | (13) |
| | | | $R_c$ | $\frac{1}{R_c} = \frac{m\cdot q^2}{2\pi\hbar^3}\int_0^\infty \frac{T(E)}{\exp\left[(E-\chi)/kT\right]-1}dE,$ | (14) |
| | Thermofield | | $J_s$ | $J_s = \frac{AT\sqrt{\pi E_{00}(q\varphi_b - qV + \chi)}}{kcth(E_{00}/kT)}\exp\left(\frac{\chi}{kT} - \frac{\varphi_b + \chi}{T_0}\right)$ | (15) |
| | | | $R_c$ | $R_c \propto \exp\left(\frac{\varphi_b}{E_{00}cth(E_{00}/kT)}\right)$ | (16) |
| | | | $T$ | $T(E_1) = \exp\left[-\frac{q\varphi_b - qV - (E_1 - \chi)}{E_{00}}\right]$ | (17) |

For thermal field emission it is established that: - the dependence of direct current on voltage is exponential;

- at each temperature value, the slope of this dependence on a semi-logarithmic scale is equal to 1/E0, and this value at a given temperature depends on the intrinsic parameters of the semiconductor, and not on the properties of the barrier;

- cutoff along the y-axis of the dependence of current on voltage on a semi-log scale gives the value of the saturation current, and the dependence

$\frac{J_s cth(E_{00} / kT)}{T}$ from $\frac{1}{E_0}$

linear on a semi-logarithmic scale, its slope corresponds to the height of the metal-semiconductor potential barrier.

Thus, if the current flow through an ohmic contact is determined by thermal field emission, then: the contact resistance increases exponentially with the height of the potential barrier $\varphi_b$; contact resistance decreases with increasing temperature, but much weaker than in the case of thermionic emission.

Processes, phenomena, and effects in friction units take place differently under pulsed and long-term loading of contact spots of microprotrusions, since here it is necessary to take into account the current residual surface-volume temperatures. The latter grow all the time, reaching the steady and thermal stabilization state of metal friction elements.

A significant part of the equivalent stresses arising in the process of braking is concentrated in the surface and near-surface layers of metal friction elements. These voltages become proportional to pulsed electric currents and flash temperatures on the contact spots of microprotrusions of friction pairs "metal-semiconductor". Here, another way of current flow is manifested - through metal shunts.

What is a shunt - a branch, an electrical conductor connected in parallel to a section of an electrical circuit to divert part of the electric current around this section. Shunts are metal atoms deposited along the lines of imperfections, such as dislocations, and short-circuit the space charge layer. At the same time, an electric field is concentrated at the edges of such "needles" and the current flow is carried out due to field emission.

Thus, metal shunts act as distributors of electrical currents in an extensive network. They unload some contact spots, others overload the contact spots of microprotrusions. The effect of "needles" causes strong local heating in thin layers of the friction surface, leading to the formation of burns of thermal spots and satellite foci of microcracks.

During cooling after braking of the metal friction element, a changeable surface and deep temperature gradient is formed, causing large thermal stresses.

## Conclusion

The results of the study of the energy levels of contacts in the frictional interaction of metal-polymer and semiconductor materials in friction pairs of brake devices made it possible to formulate the following discovery.

Previously unknown patterns of changes in pulsed electric currents in ohmic contacts "metal-semiconductor" during their contact-pulse frictional interaction are established, which consist in the fact that under the action of pulsed specific loads and energy load due to the height of the potential barrier between their materials in the contact zone and in the transition zone "metal-semiconductor"

boundary with "*n*" and "*p*" types of conductivity at different degrees of their regulated surfaces, which contribute to the concentration of charge carriers and dislocations of imperfections of the crystal lattice, and at the same time, thermionic, field and thermal field emissions are formed, accompanied by emerging metal shunts, and the energy surface Fermi level changes the effect on the surface, in the middle and in the depth of the band gap, near the edge of the valence band, as well as the resulting shift at the edge of the conduction band, which contributes to the generation of electric currents along with alternating thermal currents of various sizes and directions.

## REFERENCES

1. **Kragelsky I.V.** Friction and wear. I.V. Kragelsky. M.: *Mashinostroenie*, 1986. 430 p. *(in Russian)*
2. **Blank T.V.** Mechanisms of current flow in ohmic contacts “metal-semiconductor”. Yu. 11, 2007, s. 1281-1310 *(in English)*
3. **Goldberg Yu.A.**: FTP, 28 (10), 1681 (1994) *(in English)*
4. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I.** Nanotribologicheskie processy pri elektricheskom razryade diskretnyh omicheskih kontaktov metallopolimernyh par. *Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii*, 2020, T.12, №4, s. 12-185. G.K. Reeves. Sol. St. Electron. 23, 477 (1980) *(in Russian)*
6. **Rogov A.P.** Nano- and microstructures with zero ohmic losses in a spontaneously polarized state / A.P. Rogov, V.F. Kharlamov // Russian nanotechnologies, vol. 14, no. 5-6, 2019. Pp. 11-13 *(in English)*
7. **Mammadov R.K.** Metal-semiconductor contacts with the electric field of spots. Baku, BGU, 2003. 231 p. *(in English)*
8. **Nabiullin I.R., Lachinov A.N., Ponomarev A.F.** Remote switching effect in the “metal–polymer–metal” system. *Journal of Technical Physics*, vol. 80, no. 5, 2010. Pp. 107-110 *(in English)*
9. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A.** [and others]. Tribology: friction, wear and lubrication. Baku: *Apostroff-A*, 2019. 640 p. *(in English)*
10. **Topchevska K.** Influx of sweating rubbing on the temperature for a half hour of halmuvannya. *Physical Chemistry. Mechanics of materials*. 2017. No. 2. Pp. 96–101 *(in English)*
11. **Demkin N.B., Ryzhov E.V.** Quality of surfaces and contact of machine parts. M.: *Mashinostroenie*, 1981. 244 p. *(in English)*
12. **Izmailov V.V., Novoselov M.V.** Contact of solids and its conductivity. Tver: *From TSTU*, 2010. 112 p. *(in English)*
13. **Dingfen Wu, Heime K.** Electron. Lett. 18, 940 (1982) *(in English)*
14. **Dingfen Wu, Dening W., Heime K.** Sol. St. Electron. 29, 489 (1987) *(in English)*
15. **Padovan F.A., Stratton R.** Sol. St. Electron. 9, 695 (1966) *(in English)*

# Prospects for the Use of Maglev Trains in Azerbaijan

**H.M. Ahmadov[1], E.K. Manafov[2], M.M. Nasirova[2], F.H. Huseynov[2]**

[1] *Azerbaijan Technical University (Husein Javid ave. 25, Baku, AZ1073, Azerbaijan)*
[2]*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Huseynov Farid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

**Abstract**

The article examines the existing problems of passenger transportation in urban and suburban transport. A comparative analysis of trains with a magnetic cushion with various modes of transport is given. The history of the development of magnetic trains is given, the principle of operation of the EMC electromagnetic suspension system, the EMF electrodynamic suspension system and the permanent magnet system are considered. The advantages and disadvantages of magnetic trains are studied, the investment costs for this type of transport are analyzed. In addition to the noted obstacles that may arise when using magnetic trains, taking into account the growing problems in the operation of ground vehicles in the country, they will allow timely and high-quality satisfaction of the population's need for passenger transportation. In terms of a significant reduction in the intensity of traffic in the land transport sector in the country and the harmful compounds that they disperse into the environment, it is proposed to use these trains in the future in Azerbaijan.

**Keywords:** magnetic train, passenger transportation, electromagnetic system, electrodynamic system, system with permanent magnets, investment costs.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_41_53

***Received*** *17.02.2021*
***Revised*** *17.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Ahmadov H.M., Manafov E.K., Nasirova M.M., Huseynov F.H.*
[Prospects for the use of Maglev trains in Azerbaijan]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 41-53 *(in Azerbaijani)*

# Azərbaycanda Maqlev tipli qatarların tətbiqi perspektivləri

**H.M. Əhmədov[1], E.K. Manafov[2], M.M. Nəsirova[2], F.H. Hüseynov[2]**
[1] *Azərbaycan Texniki Universiteti (Hüseyn Cavid pr. 25, Bakı, AZ1073, Azərbaycan)*
[2] *Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**
Hüseynov Fərid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

**Xülasə**

Məqalədə şəhərdaxili və şəhərətrafı sərnişin daşımalarındakı mövcud problemlər araşdırılmışdır. Maqnit yastıqlı qatarlar müxtəlif nəqliyyat növləri ilə müqayisəli təhlil edilmişdir. Maqnitli qatarların inkişaf tarixi verilmiş, elektromaqnit asqılı EMS, elektrodinamik asqılı EDS və sabit maqnitli sistemlərin iş prinsipləri araşdırılmışdır. Maqnitli qatarların üstünlükləri və çatışmazlıqları tədqiq olunmaqla, bu nəqliyyat növünə yatırılan sərmayə xərcləri təhlil edilmişdir. Maqnitli qatarların istifadəsi zamanı yarana biləcək maneələri qeyd edilməklə yanaşı, respublika ərazisində yerüstü nəqliyyat vasitələrinin istismarı prosesində getdikcə artan problemləri nəzərə alaraq, onların əhalinin sərnişin daşımalarına olan tələbatını vaxtında və yüksək keyfiyyətlə yerinə yetirilməsinə imkan verəcəyi, respublika ərazisində yerüstü nəqliyyat sektorundakı hərəkət gərginliyini və ətraf mühitə səpələdiyi zərərli birləşmələri xeyli azaldacağı baxımından perspektivdə bu qatarların Azərbaycanda tətbiq edilməsinin məqsədəuyğunluğu təklif görülmüşdür.

**Açar sözlər:** maqnitli qatar, sərnişin daşımaları, elektromaqnit sistem, elektrodinamik sistem, sabit maqnitli sistem, sərmayə xərcləri.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_41_53

**УДК:** 629.3

# Перспективы применения поездов Маглев в Азербайджане

**Г.М. Ахмедов[1], Э.К. Манафов[2], М.М. Насирова[2], Ф.Г. Гусейнов[2]**
[1] *Азербайджанский Технический университет (пр. Г.Джавида, 25, Баку, AZ1073, Азербайджан)*
[2] *Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Гусейнов Фарид / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

**Аннотация**

В статье рассмотрены существующие проблемы пассажирских перевозок на городском и пригородном транспорте. Призведен сравнительный анализ поездов с магнитной подушкой с различными видами транспорта. Приведена история развития магнитных поездов, рассмотрены принцип работы системы электромагнитной подвески ЭМС, системы электродинамической подвески ЭДС и системы постоянного магнита. Изучены преимущества и недостатки магнитных поездов, проанализированы инвестиционные затраты на этот вид транспорта. С точки зрения значительного снижения интенсивности движения в наземном транспортном секторе страны предложено использовать эти поезда в будущем в Азербайджане, с учетом вредных соединений, которые они рассеивают в окружающей среду.

**Ключевые слова:** магнитный поезд, пассажирские перевозки, электромагнитная система, электродинамическая система, система с постоянными магнитами, инвестиционные затраты.

**Giriş**

İlk buxar lokomotivlərinin yaradılmasından təqribən 200 il keçməsinə baxmayaraq elektrik enerjisi və yanacaq (dizel, qaz və s.) hesabına sərnişin və yük daşımaları ilə məşğul olan dəmir yol nəqliyyatının dartı hərəkət vasitələri müasir texnologiyalar sayəsində mükəmməl səviyyəyədək inkişaf etmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, bütün bu illər ərzində ixtiraçı mühəndislər alternativ hərəkət vasitələrinin yaradılması üzərində aktiv işlər görmüşlər. Onların əməyinin nəticələrindən ən parlaq nümunə maqnit yastıqlar üzərindəki qatarlardır (MYQ).

Dünyada, həmçinin ölkəmizin şəhər və şəhərətrafı rayonlarında əhalinin sayı durmadan artdığından sərnişin daşımalarının həcmi də artır. Belə daşımalar üçün şəxsi avtomobillərdən istifadə edilən şəhərlərdə "pik" saatlarında hərəkət sürəti minimal həddədək azalır. Hazırda avtomobil nəqliyyatının böyük şəhərlərdə istismarı çox ciddi problemə çevrilmişdir. Onların dayanması və gözləməsi üçün nəinki yolların və küçələrin kənarları, hətta səkilər və uşaq meydançaları da zəbt olunmuşdur. Böyük şəhərlərdə ənənəvi sərnişin nəqliyyat növləri daima artmaqda olan sərnişin daşımalarının yerinə yetirilməsini təmin edə bilmir. Bəzi şəhərlərdə isə şəhərdaxili sərnişin daşımaları üçün fərdi avtomomobillərə nisbətən böyük və orta tutumlu avtomobillərin istifadəsi özünü daha çox doğruldur. Şəhərdaxili və şəhərətrafı daşımalar aşağıdakı şəraitlərdə yerinə yetirilir:

• daşıma keyfiyyəti və müntəzəmliyi yarıtmaz vəziyyətdə olur, xüsusən "pik" saatlarında yolların hərəkət vasitələri ilə yüklənmə səviyyəsi normadan 2-3 dəfədən çox olan hallarda buna daha çox təsadüf edilir;

• yerüstü şəhər nəqliyyat növlərində hərəkət sürəti azalmış (16-20 km/s) və bu da sərnişinlərin iş yerinə çatma vaxtını (həftə ərzində 8-10 saata qədər) artırmışdır. İş yerinə çatma vaxtı əksər hallarda gündəlik olaraq 1 saata qədər yüksəlir. Mütəxəssislər müəyyən etmişlər ki, sərnişinlərin iş yerlərinə çatana qədər hər 10 dəqiqə ərzində komfortsuz vəziyyətdə olmaları, onların iş qabiliyyətini və məhsuldarlığını 3-4 % azaldır;

• havanın çirklənmə dərəcəsi son illər 3-4 dəfə artmış, səs səviyyəsi isə xeyli yüksəlmişdir;

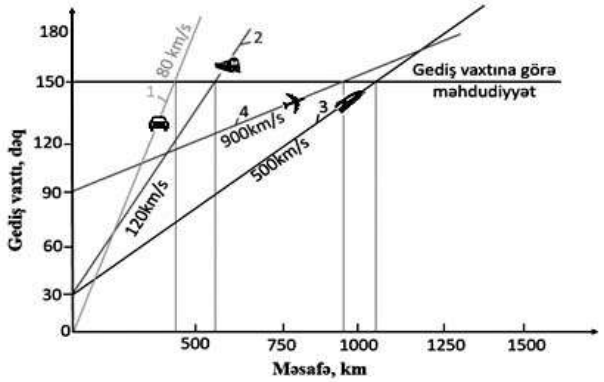
• avtomobil sərnişin daşımalarında maye yanacaq sərfi bir neçə dəfə artmışdır;

• avtomobillərin sayının artması ilə yanaşı baş verən yol-nəqliyyat hadisələrinin sayı da yüksəlmişdir. Hər il dünyada baş verən yol-nəqliyyat hadisələrində ölənlərin sayı hazırda 8 mln. nəfərdən çoxdur.

Avtomobil yollarında və hava məkanında intensiv hərəkətin olması və mövcud nəqliyyat şəbəkələrinin bu sıx hərəkət şəraitində yetərli olmaması dəmir yolu nəqliyyatına ehtiyacı daha da aktuallaşdırır. Dəmir yolu nəqliyyatında rahatlıq, təhlükəsizlik, əlçatanlıq və qısa müddətə səyahət etmək arzusu sürətli qatarlardan istifadə zəruriyyəti yaratdı. Yüksək sürətli dəmir yolu digər nəqliyyat vasitələri ilə müqayisədə bir çox üstünlüklərə malikdir [1, 2].

**Məsələnin qoyuluşu**

Mütəxəssislər qeyd edirlər ki, uzaq məsafələrə hərəkət zamanı sərnişinin yolda olma vaxtı ("qapıdan-qapıya" hərəkətdə) 3-4 saatdan artıq olmamalıdır. Müxtəlif nəqliyyat növlərinin hərəkətdə olma müddəti 2,5 saat olmaqla, onların istifadə edilmə xüsusiyyətləri mütəxəssislər tərəfindən araşdırılmışdır (şək. 1). Müəyyən edilmişdir ki, qeyd edilən müddət ərzində sərnişin avtomobillə 150 km, qatarla 250 km, təyyarə ilə 900 km, MYQ ilə təqribən 1000 km məsafə qət edir. Müasir nəqliyyat növlərilə müqayisədə MYQ 50-1100 km məsafələrdə vaxta qənaət etməyə imkan yaradır.




**Şəkil 1** – Sərnişin daşımalarında 2, 5 saat ərzində müxtəlif nəqliyyat növləri ilə qət edilən məsafələr:
1 - şəxsi avtomobillər (tıxacları nəzərə almaqla);
2 - dəmiryol nəqliyyatı; 3 - MYQ; 4 - hava nəqliyyatı
**Figure 1** – Distances covered by different modes of transport for 2, 5 hours in passenger transportation:
1 - private cars (including traffic jams); 2 - railway transport; 3 - MLT; 4 - air transport

Vaxt baxımından hava nəqliyyatı ilə müqayisədə maqnitli nəqliyyat daha səmərəlidir. Çünki, təyyarə ilə uçmaq üçün ən azı 2 saat əvvəl hava limanında olmaq, təyyarədən düşdükdən sonra isə baqajı götürmək üçün bir müddət gözləmək lazım olduğu halda, bu qatardan istifadə etmək üçün baqajla birgə 5-10 dəqiqə əvvəl stansiyada olmaq kifayət edir və mənzil başında qatardan düşdükdən sonra baqajı gözləməyə ehtiyac duyulmur. Bundan əlavə, hava limanının şəhərdən xeyli kənarda yerləşməsi səbəbindən hava limanına getmək üçün əlavə vaxt və nəqliyyat lazım gəldiyi halda, səssiz və nisbətən ekoloji təmiz MYQ şəhərin mərkəzindən keçə bilir.

Həmçinin, MYQ-da enerji və ya yanacaq sərfi hava nəqliyyatına nisbətən 2 dəfədən də azdır. Təyyarələrin uça bilmədiyi yararsız hava şəraitində sərnişinlərin ləngimələrini və öz planlarını dəyişərək həyəcanlanmalarını da xüsusi qeyd etmək lazımdır. Yaddan çıxarmaq olmaz ki, hava nəqliyyatı ilə ətraf mühitə səs və zərərli qazlarla göstərilən mənfi təsirlər sərnişinlərə və ətraf ərazilərdə yaşayan əhaliyə ziyan yetirir, kənd təsərrüfatına yararlı xeyli hamar münbit torpaq sahəsi hava limanı ərazisi üçün istifadə edilir [3].

Qeyd etmək lazımdır ki, 400-500 km/saat MYQ üçün son sürət həddi sayılmır. Nisbətən böyük hərəkət sürətlərində aerodinamik müqaviməti dəf etmək üçün çox yüksək enerji sərf etmək lazım gəlir. Ənənəvi dəmir yollarının yataqlarında hərəkət edə bilməmələri Maqlev (maqnit levitasiyalı) qatarlarının istənilən yerdə tətbiq olunmasına maneə yaradır.

Belə qatarların hərəkəti üçün xüsusi magistralların tikintisinə ehtiyac duyulur. Bu isə, öz növbəsində böyük sərmayə qoyuluşunu tələb edir. Bundan əlavə, Maqlev qatarları üçün yaradılan güclü maqnit sahələri insan orqanizminə mənfi təsir göstərir. Ona görə də bu məsələ trassanın yaxınlığındakı sahədə yaşayan əhalinin sağlamlığında müəyyən qədər özünü büruzə verir. Göstərilən amil səbəbindən qatarı idarə edən maşinistin və sərnişinlərin qorunması üçün Maqlevin salonu daxildən xüsusi materiallar vasitəsi ilə ekranlaşdırılır.

Maqnitli qatarların xeyrinə ən güclü faktor sürətli dəmiryol nəqliyyatına nisbətən onların 2-3 dəfə daha böyük hərəkət sürətinə malik olmalarıdır. Maqnit asqılı nəqliyyat sisteminin yaratdığı maqnit sahəsindən başqa onun ətraf mühitə göstərdiyi ekoloji ziyan hiss olunmur, estakadalar üzərində qurulduğundan kənd təsərrüfatına yararlı torpaqları zəbt etmir, qatarların hərəkəti zamanı yerin səthində səs və titrəmələr yaratmır [4, 5].

Müasir dəmir-beton estakadaların tikintisinin orta dəyəri metro xəttinin dəyərindən 3-8 dəfə az, inşa tempi isə 5-10 dəfə yüksəkdir. Lakin, estakadalar yerüstü avtomobil və dəmir yollarının inşasından baha başa gəlir. Qeyd edilənlərdən başqa estakadalar öz üstünlükləri ilə diqqəti daha çox cəlb edir: az torpaq işləri görülür, dayaqların sahəsinə uyğun kiçik torpaq sahələri zəbt edilir, tikinti elementlərinin

zavodlarda hazırlanması mümkün olur, təmas xətlərinin və kabellərin estakadaya bərkidilməsi nisbətən asanlaşır, istismar və texniki xidmət məsələləri rahat yerinə yetirilir. Estakadaları mövcud avtomobil və dəmir yollarının üst hissəsindən, hətta onları 2 mərtəbəli və ya müxtəlif istiqamətli hərəkətlər üçün də inşa etmək mümkündür. Yüksək sürəti təmin edəcək estakadalı qısa kəsmə yollar şəhərdən kənarda yerləşən yaşayış massivlərini əhalinin iş yerləri ilə, istirahət zonaları ilə və şəhərin ətraf qəsəbələri ilə əlaqələndirmək üçün əsas vasitələrdən biridir. Maneələri aradan qaldırmaq üçün estakadaları evlərin, çayların, yolların və meşə massivlərinin üzərindən keçməklə düzxətli inşa etmək mümkündür. Ekoloji cəhətdən nisbətən təmiz nəqliyyat növü kimi maqnitoplanlar estakadalı yollarla kurort zonalarında da geniş istifadə oluna bilər. Bəzi qədim şəhərlərdə binaların arxitektur mənzərəsini pozmamaq üçün lazım gəldikdə maqnitoplanları "yerin altına" da (tunellərə) istiqamətləndirmək mümkündür [6].

Kütləvi sərnişin daşımaları zamanı bütün qeyd edilən cəhətləri nəzərə almaqla ənənəvi nəqliyyat növlərinə nisbətən "maqnitli" nəqliyyat növü daha əlverişli sayılır və bu nəqliyyat növü ilə daşıma uzaqlığından asılı olaraq müxtəlif hərəkət sürətlərini təmin etmək mümkün olur. Məsələn, şəhərlərarası daşımalarda maksimal sürət 400-500 km/s, şəhərətrafı daşımalarda 200-250 km/s, şəhərlə hava limanını əlaqələndirmək üçün 250-300 km/s, şəhərdaxili daşımalarda isə 100-130 km/s daha əlverişli sayılır. Qeyd edilən hərəkət sürətləri ənənəvi yerüstü nəqliyyat növlərinin sürətlərindən 2-5 dəfə yüksəkdir.

Qeyd etmək lazımdır ki, şəhərətrafı və şəhərlərarası sərnişin daşımalarında yüksək hərəkət sürətini təmin edən dəmir yolları "maqnitli" yollarla rəqabət yarada bilər. Belə ki, maqnitoplanın özünün dəyəri və "maqnitli" yolun çəkilişinə sərf olunan xərc dəmiryol nəqliyyatına nisbətən ümumilikdə 1,5-3 dəfə artıqdır. Lakin, ingilis mütəxəssislərinin tədqiqatları ilə müəyyən edilmişdir ki, sürtünmə prosesləri ilə əlaqədar dəmir yolunun təmir və texniki xidmət xərcləri "maqnitli" yollara nisbətən 15-20% yüksəkdir. Bütün bu qeyd edilənlər yerüstü nəqliyyat növü kimi gələcəkdə maqnitoplanların sərnişin daşımalarında geniş istifadə ediləcəyini bir daha sübuta yetirir. Çinin İnçxon aeroportundan çəkilən maqlev xəttinin böyük dəyərinə baxmayaraq, onun yaradıcıları da təsdiq edirlər ki, bu qiymət adi dəmir yollarından 2/3 dəfə azdır. Onların araşdırmalarına görə maqlevin işi üçün elektrik enerji sərfiyyatı adi dəmiryol qatarları ilə müqayisədə 30 % çox olmasına baxmayaraq, Maqlev qatarlarının istismarı 60-70 % ucuz başa gəlir. Tətbiq perspektivlərinə baxmaq üçün Maqlev qatarlarının növlərini və iş prinsiplərini, bu tip qatarların üstünlükləri və çatışmazlıqlarını, həmçinin onların sərmayə xərclərini araşdırmaq lazımdır [7].

**Məsələnin həlli**

Yüksək sürətli qatarların istifadəsinin artırılmasında əsas amillər avtomobil və hava nəqliyyatının yüksək hərəkət intensivliyinə malik olmaları, belə qatarların isə ümumilikdə ətraf mühitə ekoloji cəhətdən nisbətən az mənfi təsir göstərməklə istismarının mümkün olmasıdır. İlk Shinkansen sürət qatarları 1964-cü ildə Yaponiyada, TGV tipli qatarları 1981-ci ildə Fransada, ICE tipli yüksək sürətli qatarları isə 1991-ci ildə Almaniyada istifadə edilmişdir (şək. 2).

Maqnitli yastıq üzərində hərəkət edən qatar, maqnitoplan və yaxud maqlev – elektromaqnit sahəsinin təsiri ilə yol yatağının üzərində saxlanmaqla hərəkət edən qatardır. Belə hərəkət vasitəsi ənənəvi qatarlardan fərqli olaraq

hərəkət prosesində relslərin səthinə toxunmur. Qatar ilə yol yatağının səthi arasında müəyyən hava məsaməsi mövcud olduğundan onlar arasında sürtünmə prosesi baş vermir. Belə halda hərəkətə qarşı yaranan yeganə müqavimət qüvvəsi aerodinamik müqavimətdir. Belə sistemlər monorels nəqliyyat növünə aid edilir. Maqnit yastıqları üzərində qatarların hərəkətinin mümkünlüyü ideyasını hələ XX əsrin əvvəllərindən aktiv şəkildə həyata keçirməyi arzulayırdılar. Lakin bir sıra səbəblərdən həmin dövrdə bu layihəni həyata keçirmək mümkün olmamışdır. Sonradan 1969-cu ildə ilk dəfə Almaniyada maqlev adlandırılan yeni hərəkət vasitəsinin hərəkət edəcəyi maqnit xəttinin quraşdırılmasına başlanıldı. Belə qatarın ilk istismarı 1971-ci ildə həyata keçirilmişdir.

Maqnit xətti üzərində "Transrapid-02" (şək. 3) adlandırılan ilk maqlev qatarı hərəkətə gətirilmişdir. "Transrapid-02" qatarını sürətli hərəkət vasitəsi adlandırmaq düzgün olmazdı, çünki onun həmin dövrdə maksimal hərəkət sürəti 90 km/saat, sərnişin tutumu isə cəmi 4 nəfər idi.

1979-cu ildə Maqlev tipli qatarın quruluşu müəyyən qədər təkmilləşdirilərək "Transrapid-05" adlandırıldı (şəkil 3). Belə qatar artıq 68 nəfər sərnişin daşıma qabiliyyətinə malik idi. Bu qatar üçün Hamburq şəhərində 908 m uzunluğunda xətt inşa edilmiş və onun üzərində qatar 75 km/saat sürətlə hərəkət edə bilmişdi. Həmin il Yaponiyada Maqlevin "ML-500" adlanan digər bir modeli nümayiş etdirildi. Yaponiyada maqnit yastığı üzərində hərəkət etmə prinsipinə malik belə qatar artıq 517 km/saat sürət əldə edə bilmişdi [8].

İlk kommersiya məqsədləri üçün layihələndirilmiş maqnit yastığı üzərində hərəkət etmə imkanına malik olan maqnitoplan (M-Bahn) 1984-cü ildə İngiltərənin Birmenhem şəhərində fəaliyyətə başlamışdı. Belə maqnit yastıqlı xətt Birmenhem beynəlxalq hava limanı terminalını yaxınlıqdakı dəmiryol stansiyası ilə əlaqələndirmişdi. Bu xətt 1984-1995-ci illər ərzində müvəfəqiyyətlə fəaliyyət göstərdi. Maqnit yolunun uzunluğu 600 m, xətti asinxron mühərrikli hərəkət vasitəsinin yol yatağından aralanaraq qaldırılma hündürlüyü isə 15 mm təşkil etmişdi.

**Şəkil 2** – Shinkansen, TGV və ICE tipli yüksək sürətli qatarlarının ilk nümunələri
**Figure 2** – The first examples of high-speed trains Shinkansen, TGV and ICE

**Şəkil 3** – Transrapid-02 və Transrapid-05 qatarları
**Figure 3** – Transrapid-02 and Transrapid-05 trains

Artıq 2003-cü ildə onun yerində *Cable Liner* texnologiyasına əsaslanaraq *AirRail Link* sərnişin daşıma sistemi yaradılmışdır. 1980-cı ildən maqnit yastığı üzərində hərəkət edən yüksəksürətli qatarların yaradılması və istismarı üzrə layihələrə İngiltərə, Almaniya və Yaponiya ilə birgə Cənubi Koreya, Çin və ABŞ da qoşuldu.

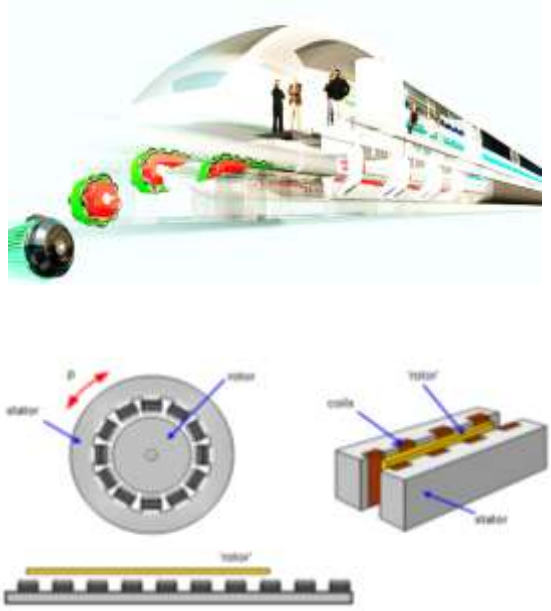
Maqnit yastıqları üzərində hərəkət edən qatarlar xüsusi nəqliyyat növünə aid edilir. Hərəkət zamanı Maqlev tipli qatarlar yol yatağına toxunmadan sanki onun üzərində uçur. Bu proses qatarın süni yaradılmış maqnit sahəsinin təsiri ilə idarə olunması hesabına baş verir.

Məlumdur ki, iki maqnitin eyni qütblərini bir-birinə yaxınlaşdırsaq, onlar bir-birini itələyəcək və onlar arasında hava məsaməsi, yəni maqnit yastığı yaranacaqdır. Maqlev qatarının hərəkətinin əsasını məhz bu sadə prinsipə əsaslanaraq relslərdən müəyyən hündürlükdə saxlanmaqla yerdəyişmə imkanına malik olması təşkil edir.

Hazırda maqnit yastığı və yaxud asqısının yaradılması üçün iki texnologiya işlənib hazırlanmış, üçüncü isə sınaq mərhələsindədir və yalnız kağız üzərində mövcuddur [9].

Qatarın irəliyə doğru hərəkəti xətti mühərrik vasitəsilə (şək. 4) həyata keçirilir. Adi elektrik mühərriklərində halqa formasında olmasına baxmayaraq, belə mühərriklərin stator və rotoru açılmış şəkildə – uzununa lövhə formasındadır. Stator dolaqları növbə ilə qoşularaq "qaçan" maqnit sahəsi yaradır.

Qatarın alt hissəsinə bərkidilmiş rotor bu sahə ilə qarşılıqlı təsirdə olaraq qatarı hərəkət etdirir. Sistemin etibarlı işini təmin etmək üçün stator və rotor arasındakı məsamə sabit saxlanılmalıdır. Bu məsələ, monorels yollarının bütün tiplərinin özünəməxsus xüsusiyyətləri (yan asqılı yollardan başqa) və hərəkət zamanı vaqonların yellənməsi (əsasən də əyrixətli sahələrdə eninə yerdəyişməsi) səbəbindən çətin əldə olunur. Ona görə də, bunun üçün ideal yol infrastrukturu qurulmalıdır.



**Şəkil 4** – Xətti mühərrikin quruluşu
**Figure 4** – Structure of a linear motor

*Elektromaqnit asqılı sistem "EMS".* Zamana görə dəyişən elektromaqnit sahəsinin təsirinə əsasən maqlevin levitasiyası, yəni havada asılı qalması həyata keçirilir. Bu halda qatarın hərəkəti üçün keçirici materialdan (adətən metaldan) hazırlanmış T-şəkilli relslər lazım gəlir. Belə konstruksiya dəmiryol xəttini xatırladır. Lakin burada qatardakı təkərlərin əvəzinə dayaq və istiqamətləndirici maqnitlər quraşdırılır (şək. 5).

Bu maqnitlər T-şəkilli yol yatağının kənarlarında olan ferromaqnit statorlara paralel yerləşdirilir.

Rels maqnitlərindəki elektrik cərəyanı saniyədə təqribən 100 000 dəfə qoşulub açılır və sürtünmə qüvvəsinin təsirinə məruz qalmadan xətti hərəkət təmin olunur. Hər bir vaqonun metaldan hazırlanmış aşağı çıxıntılarına elektron idarəetmə sisteminə malik elektromaqnitlər quraşdırılır.

**Şəkil 5** – EMS texnologiyası
**Figure 5** – EMS technology

Onlar xüsusi T-şəkilli relsin alt tərəfində yerləşdirilmiş maqnitlərlə qarşılıqlı təsirdə olur və nəticədə qatar yol üzərində asılı qalır. Yan maqnitlər həmin prinsiplə yan tərəflərin tarazlığını təmin edir. Yol boyu qatarı hərəkətə gətirəcək maqnit sahəsini yaradan xətti mühərrikin dolaqları quraşdırılır.

Belə qatarın altında polad yol yatağının bir neçə santimetrliyində yerləşdirilmiş güclü maqnitlər quraşdırılır. Qatarın hərəkəti zamanı yol yatağının konturundan keçən maqnit seli daim dəyişir və yataqda qatarın maqnit asqısını itələyən güclü maqnit sahəsini yaradan böyük induksiya cərəyanları əmələ gəlir. Bu halda yaranan qüvvə o qədər böyük olur ki, müəyyən sürət əldə edən qatar, yataqdan bir neçə santimetr məsafəyə qədər aralanır və faktiki olaraq havada uçaraq hərəkət edir. Qatar eyni qütblü maqnitlərin itələnmə və əksinə müxtəlif qütblü maqnitlərin cəzb olunması hesabına levitasiya edir.

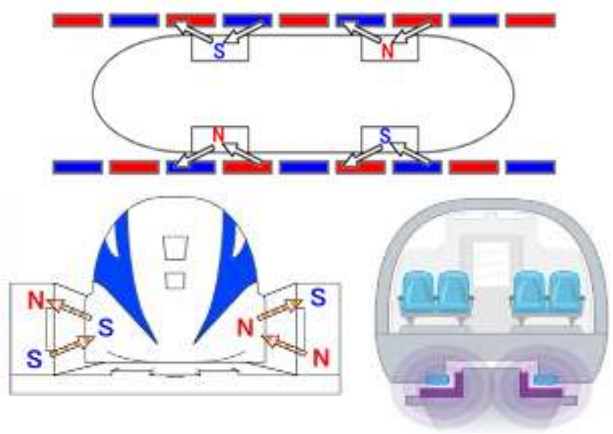
"Transrapid" qatarının yaradıcıları maqnit asqısı üçün gözlənilməz sxem tətbiq etmişlər. Onlar eyni qütblərin itələnməsindən deyil, müxtəlif qütblərin cəzb olunmasından istifadə etmişlər. Maqnit üzərində yükü asmaq çətin məsələ deyil, belə sistem dayanıqlıdır. Lakin maqnitin alt hissəsində bunu etmək praktik olaraq mümkün deyil. Əgər bu zaman idarəolunan elektromaqnit götürülərsə, onda bu proses dəyişəcəkdir. Nəzarət sistemi maqnitlər arasındakı məsamənin 10 millimetrə qədər sabit saxlanmasını təmin edə biləcəkdir [10].

Məsamənin çoxalması zamanı bu sistemdə aparıcı maqnitlər cərəyanın gücünü artırır və bu yolla qatarı aşağı dartır. Məsamənin azalması zamanı isə cərəyanın gücü azaldılır və məsamə artırılır. Belə sxemin 2 böyük üstünlüyü mövcuddur: yol yatağının maqnitli elementləri iqlim şəraitinin təsirlərindən mühafizə olunur; bu elementlərin sahəsi isə yol və qatar arasındakı kiçik məsamə hesabına əhəmiyyətli dərəcədə zəifdir. Ona görə də o, daha kiçik gücə malik cərəyanlar tələb edir. Müvafiq olaraq, belə konstruksiyaya malik olan qatar iqtisadi cəhətdən daha səmərəli sayılır.

Sistemin dayanıqlığı maqnitlənmə dolaqlarındakı cərəyanın avtomatik tənzimlənməsi ilə təmin edilir: xüsusi vericilər qatarla yol yatağı arasındakı məsaməni daim ölçür və avtomatik sistem elektromaqnitlərə məsaməyə uyğun gərginlik ötürür. Sürətlə işləmə qabiliyyətinə malik olan idarəetmə sistemi yol və qatar arasındakı məsaməyə daim nəzarət edir. EMS texnologiyası bazasında yaradılmış qatarların əyləcləməsi aşağı təcilli sinxron xətti mühərriklə həyata keçirilir. O, dayaq maqnitləri və yol yatağı elementlərindən ibarət olur. Qatarın sürətini və dartı qüvvəsini yaradılan dəyişən cərəyanın tezliyinin və gücünün dəyişdirilməsi ilə tənzimləmək mümkün olur. Sürəti azaltmaq üçün maqnit dalğalarının istiqamətini dəyişmək kifayət edir.

*Elektrodinamik asqılı sistem "EDS".* Yüksəkkeçirici maqnitlər əsasında yaradılmış elektrodinamik asqı – EDS yol yatağındakı maqnit sahəsi ilə qatarda quraşdırılmış yüksəkkeçirici maqnitlərin yaratdığı sahənin qarşılıqlı təsirindən alınan levitasiya hesabına əldə olunur. Yüksəkkeçirici maqnit – yüksəkkeçirici materiallı dolaqlardan ibarət olan elektromaqnitdir. Yüksəkkeçirmə vəziyyətində olan dolaq

demək olar ki, müqavimətə malik olmur. Əgər belə dolaq qısa qapanmışsa, onda orada yaradılmış cərəyanı praktik olaraq uzun müddət saxlamaq mümkündür. Yüksəkkeçirici maqnitin dolaqlarında dövr edən sönməyən cərəyanın maqnit sahəsi stabildir və döyünən deyildir. Yüksəkkeçirici materialın kritik temperaturdan yuxarı qiymətlərində maqnitin dolağı yüksəkkeçiricilik qabiliyyətini itirir. Belə temperatur dolaqda kritik cərəyan və yaxud kritik maqnit sahəsinin əldə olunması məqsədiylə yaradılır. Bunları nəzərə alaraq, yüksəkkeçirici maqnitlərin dolaqları üçün temperatur, cərəyan və maqnit selinin yüksək qiymətlərinə malik olan materiallar tətbiq edilir.




**Şəkil 6** – EDS texnologiyası
**Figure 6** – EDS technology

EDS sisteminin güc elementləri qatarda quraşdırılmış yüksəkkeçiricili solenoidlərdən və yol strukturunda yerləşdirilmiş keçirici lövhələrdən və yaxud qısaqapanmış konturlardan ibarətdir. Cərəyanlı solenoidlərin keçirici elementlər üzərindən hərəkəti zamanı sonuncuda burulğanlı cərəyanlar yaranır. Bu cərəyanlarla solenoidlərin maqnit sahəsi arasındakı qarşılıqlı təsir itələmə qüvvələrinin yaranmasına səbəb olur. Yapon mütəxəssisləri tərəfindən bu prinsipə əsaslanan maqnit asqısı üzərində hərəkət edən qatar (*JR-Maqlev*) yaradılmışdır (şəkil 6).

*JR-Maglev* – Yaponiya Dəmiryol Texnikasının Tədqiqat İnstitutu (*Japan Railway Technical Research Institute*) və *Japan Railways* dəmiryol operatoru tərəfindən layihələndirilib ərsəyə gətirilən maqnit asqılı yüksəksürətli yapon qatarları sistemidir. 2015-ci ildə *Yamanasi* əyalətində qurulmuş sınaq sahəsində L0 modifikasiyalı *Sinkansen* sınaq qatarı təkərsiz dəmiryol nəqliyyatı üçün 603 km/saata sürət rekordu əldə etmişdir. Bu sistemin adi əyləcləmə rejimi üçün elektrodinamik əyləcləmədən istifadə olunur. Fövqəladə hallarda isə qatardakı açılan aerodinamik əyləclərdən və arabacıq təkərlərindəki diskli əyləclərdən istifadə olunur. *JR-Maglev* qatarında quraşdırılmış yüksəkkeçirici maqnitlərdən ibarət elektrodinamik asqıdan (EDS) və yolda quraşdırılmış 8 rəqəmi formasındakı xüsusi elektrik keçiricilərindən istifadə edilir.

Hazırda Çində Şanxaydan *Pudun* hava limanınadək fəaliyyət göstərən xəttdəki Transrapid Alman sistemindən fərqli olaraq *JR-Maglev* sistemində monorels sxemindən istifadə edilmir. Burada qatarlar maqnitlər arasındakı kanalda hərəkət edir (şəkil 7).

**Şəkil 7** – Qatarın hərəkət etdiyi kanal və ən müasir qatarın ön forması
**Figure 7** – The channel through which the train moves and the front form of the most modern train

Belə sxem yüksək hərəkət sürəti əldə etməyə imkan yaratmaqla yanaşı istismar sadəliyi ilə də fərqlənir və sərnişinlərin təxliyyəsi zamanı onların təhlükəsizliyini təmin etmək imkanına da malik olur.

Çindəki *Yamanisi* xəttində ön tərəfdən 14 m uzunluqlu adi ucuşiş formadan praktik ola-

raq yastı (müstəvi) formalara malik bir neçə qatarın sınağı keçirilmişdir (şəkil 7). Sınaqlarla müəyyən edilmişdir ki, uc hissəsi yastı formada olan qatarın yüksək sürətlə tunelə daxil olması zamanı gurultulu səsin qarşısı alınır. Qatarın idarə olunması kompüterlə həyata keçirilir. Baxış üçün maşinist kabinasının ön pəncərəsi olmadığından maşinist yalnız videokamera vasitəsilə yolun təsvirini kompüterdə müşayiət etməklə hərəkətə nəzarət edir.

EMS elektromqnit asqısının qatarlarından fərqli olaraq EDS texnologiyası əsasında yaradılmış qatarlarda kiçik hərəkət sürətlərində (150 km/saat-dək) hərəkət üçün qatarda əlavə təkərlər nəzərdə tutulur. Sürətlənmə zamanı tələb olunan sürətə çatdıqdan sonra təkərlər yerdən aralanır və qatar yer səthindən bir neçə santimetr hündürlükdə «uçmağa» başlayır. Həmçinin qəza halları zamanı təkərlər qatarın daha yumşaq şəkildə hərəkətinə imkan yaradır. Lakin *JR-Maglev* ilə həyata keçirilən EDS sisteminin tikintisi və istismarı Transrapidin EMS sistemindən daha çox xərc tələb edir [11].

EDS sisteminin əsas üstünlüyü onun daha yüksək stabilliyə malik olmasındadır. Yol yatağı və maqnitlər arasında məsafənin azalması zamanı itələmə qüvvəsi yaranaraq maqnitləri ilkin vəziyyətinə qaytarır. Eyni zamanda məsafənin artması itələmə qüvvəsini azaldaraq cəzbetmə qüvvəsini artırır ki, bu da sistemin stabilliyinə gətirib çıxarır. Bu halda qatarla yol yatağı arasında məsaməyə nəzarət və düzəliş olunması üçün elektronikanın imkanlarından istifadəyə ehtiyac duyulmur. EDS sisteminin çatışmayan cəhəti isə 150 km/saat-dək hərəkət sürətlərində qatarların təkərlərlə təchiz olunmasına ehtiyacın duyulmasındadır. Təkərlərin hərəkəti üçün qurulmuş relslər yol yatağının bütün uzunluğu boyunca inşa edilməlidir ki, bu da baş verə biləcək hər hansı texniki nasazlıq səbəbindən qatarın istənilən yerdə dayandırılması üçündür. EDS sisteminin daha bir mənfi cəhəti aşağı sürətlərdə yol yatağında itələyici maqnitlərin ön və arxa hissələrində onların əksinə təsir göstərən sürtünmə qüvvəsinin yaranmasıdır. Bu, *JR-Maqlevin* tam itələyici sistemdən imtina etmə və yan levitasiya sisteminə müraciət etmə səbəblərindən biridir. Onu da qeyd etmək lazımdır ki, sərnişin salonunda güclü maqnit sahəsindən mühafizə məqsədilə xüsusi qurğuların tətbiqinə ehtiyac vardır. Ürək-damar problemləri olan sərnişinlər üçün ekranlaşdırılmamış qatarda səyahət etmək təhlükəli sayılır.

*Sabit maqnitli EDS sistemi.* Sabit maqnitli asqı sistemi yeni və iqtisadi cəhətdən ən səmərəli sistemdir (şəkil 8). Sistemin qatarlarında istifadə edilən diamaqnetik materiallar, onlara təsir edən xarici maqnit sahəsinin istiqamətini dəyişməklə əksinə maqnitlənən maddələrdir.

**Şəkil 8** – Sabit maqnitli asqı sistemi
**Figure 8** – Fixed magnetic suspension system

Xarici maqnit sahəsi mövcud deyilsə, diamaqnetiklər maqnit momentinə malik olmur. Belə texnologiyanın üstünlüyü aşağı sürətlərdə və hətta dayanacaqlarda dayanan zaman qatarın yol yatağı üzərində havada qalma imkanını yaradır. Bu texnologiyada sabit maqnitlərdən istifadə edilir. Ağır çəkili qatarın havada saxlanılması üçün güclü maqnit sahəsi tələb olunduğundan, maqnitlərin çəkisi kifayət

qədər yüksək olmalıdır. Qeyd edilən bu texnologiya hələ ki, praktik olaraq tətbiq olunmamışdır. Buna əsas səbəb kimi böyük kütlə və ölçülərə malik olan sabit maqnitlərin çox baha başa gəlməsi ilə izah olunur. Bu texnologiyaya yaxın olan, lakin hələ də kağız üzərində mövcud olan texnologiya "*Inductrack*" sabit maqnitlərinin tətbiq edildiyi EDS sistemidir.

Məlumdur ki, *Inductrack* sabit maqnitlərinin aktivləşdirilməsi üçün enerji lazım gəlmir. Yaxın dövrədək tədqiqatçılar hesab edirdilər ki, sabit maqnitlər qatarın levitasiyası üçün kifayət qədər gücə malik deyil. Lakin, bu problemi maqnitlərin "*Halbax massivi*"ndə yerləşdirilməsi yolu ilə həll etmək mümkün olmuşdur. Bu variantda maqnitlər elə formada yerləşdirilir ki, maqnit sahəsi massivin altında deyil, üstündə yaranır və eyni zamanda qatarı 5 km/saat-dək çox kiçik sürətlərdə belə havada saxlamaq mümkün olur. Sabit maqnitlərdən ibarət belə massivlərin dəyəri çox böyük olduğundan, hələ bu texnologiya üzrə kommersiya layihəsinə baxılmamışdır.

Çox yüksək ilkin investisiya xərcləri, məsafə, relyef və ekoloji şərait xüsusiyyətləri, həmçinin bəzi xərclərdən asılı olaraq dəyişkənlik məsələsi Maqlev qatarlarının geniş tətbiq dairəsinə malik olmasına ciddi təsir göstərir. Digər tərəfdən, dünyanın hər yerində nəhəng hava yolları şirkətlərinin Maqlev investisiyalarına qarşı müqavimət göstərmələri də özünü büruzə verir [12].

Məlumdur ki, qatarlarla bağlı qəzaların baş verməsinin ən böyük səbəbi, onların hərəkətində eyni səviyyəli keçidlərin mövcudluğudur. Maqlev qatarlarının fərqli üstünlüyü ondan ibarətdir ki, onların öz fərdi yolları mövcuddur və digər hərəkət vasitələri ilə eyni səviyyəli keçidləri yoxdur, həmçinin maqlev qatarlarına pis hava şəraiti də ciddi təsir göstərmir. Bunlardan başqa Maqlev qatarlarının etibarlılıq səviyyələri və digər üstünlükləri də bütün hava şəraitlərində təyyarələrdən daha yüksəkdir. Maqlev qatarlarını təhlükəsizlik baxımından adi qatarlarla müqayisə etdikdə də onların üstünlüyü aydın görünür. Bu qatarlar ənənəvi nəqliyyat vasitələrinə nəzərən etibarlı və səssizdir. Bu qatarlar atmosferi zərərli qazlarla çirkləndirmədiyinə görə şəhərlər üçün ideal nəqliyyat növüdür.

Nəqliyyat strukturuna yatırılan xərclərn həcmi ilə istismar xərcləri bir-biri ilə sıx bağlı olur. Maqnitli qatarların ilkin istismarına qədər sərf olunan xərclərə ərazinin dağlıq və ya düz olması, şəhər və ya şəhərdənkənar ərazilər kimi amillər əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərirlər. Cədvəldə müxtəlif ərazi şəraitlərinə uyğun olaraq maqnitli qatar və yüksək sürətli qatar üçün hər bir kilometrə uyğun sərmayə xərcləri göstərilmişdir.

**Cədvəl** – Maqnitli və yüksək sürətli qatarların sərmayə xərclərinin müqayisəsi
**Table** – Comparison of investment costs of magnetic and high-speed trains

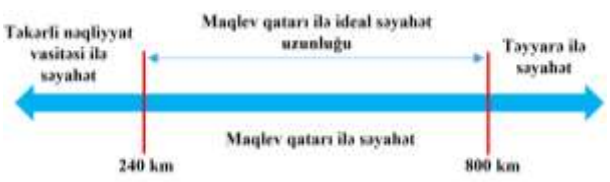
| Müxtəlif ərazi şəraitlərinə uyğun sərmayə xərcləri | Yüksək sürətli qatar və xətt (mln dollar) | Maqlev qatarı və xətt (mln dollar) |
|---|---|---|
| Az inkişaf etmiş ərazilərdə | 8.8 | 17 |
| Şəhərətrafı ərazilərdə | 30.6 | 37.4 |
| Dağlıq ərazilərdə | 34 | 40.8 |
| Sıx şəhər ərazilərində | 54.4 | 61.2 |

Xərclər arasındakı belə əhəmiyyətli dərəcədə fərqlərin yaranmasına müxtəlif amillərin təsiri olsa da, torpaq şəraitinin təsiri ən mühüm amil sayılır. Bundan əlavə, maya dəyərinə təsir edən digər amil, xəttin keçdiyi yerin yaşayış məntəqələrinə yaxın olub-olmaması ilə bağlıdır.

Bundan əlavə, sürətli qatar xəttinin inşasına daha az xərc çəkilməsinin digər mühüm amili əksər yerlərdə mövcud xətlərin bərpası və sürətli qatarların hərəkəti üçün münasib şəraitin yaradılmasıdır. Ümumilikdə, hər bir kilometrə görə tikinti xərcləri 17-65 milyon dollar arasında dəyişir. Şübhəsiz ki, bu fərqlərin yaranmasında ən böyük amil ərazi şəraitidir. Maqlev qatarlarının geniş istifadə oluna bilməməsi, qiymət baxımından ətraflı araşdırmaya imkan vermir. Digər tərəfdən, Maqlev qatarlarının aşağı istismar xərcləri bu mövzuda tədqiqatların aparılmasını aktuallaşdırır.

Maqlev qatarları ilə bağlı ölkəmizdə onların tətbiqi baxımından heç bir araşdırma aparılmadığı üçün onların hər bir kilometr vahidinin dəyərini təhlil etmək mümkün deyil. Amerika Birləşmiş Ştatları Dəmiryol İdarəsinin (USFRA) 2005-ci il hesabatına görə 1 kilometrlik maqlev xəttinin tikinti dəyəri 31,25-62,50 milyon dollar arasında dəyişir. Maqlev qatarları ilə ideal səyahət uzunluğu 240 kilometrdən çox olduqda daha aydın görünür. Qısa məsafələrdə maksimum sürətə çatmamaq və səyahət vaxtını səmərəli şəkildə azaltmamaq problemlərinə təsadüf olunur. Məsafə 800 kilometrdən çox olan hallarda sərnişinlərin hava nəqliyyatı ilə daşınması daha məqsədəuyğundur.

Nəqliyyat növlərinə görə sərnişinlərin daşınma məsafəsinin ideal uzunluğu aşağıdakı sxemdə göstərilmişdir (şəkil 9).




**Şəkil 9** – Nəqliyyat növlərinə görə sərnişinlərin daşınma məsafəsinin ideal uzunluğu
**Figure 9** – Ideal length of passenger transportation by type of transport

**Nəticə**

Respublikamızın böyük şəhərlərində, xüsusən paytaxt Bakıda avtomobil nəqliyyatının hərəkətində yaranan ciddi problemlər, gələcəkdə estakadalar üzərində qurulması mümkün olan "maqnitli" yolların köməyilə aradan qaldırıla bilər. Respublikanın coğrafi şəraitini və relyefini nəzərə alaraq, cənub zonasını Lənkəran Beynəlxalq Hava Limanı, Lənkəran və Bakı şəhərlərinin dəmiryol və avtomobil vağzalları və Heydər Əliyev Beynəlxalq hava limanından keçməklə Şimal zonası ilə, həmçinin H.Əliyev Beynəlxalq hava limanını bir sıra rayon mərkəzlərindən, Gəncə şəhərindən və Gəncə Beynəlxalq hava limanından keçməklə Respublikanın qərb zonası ilə "maqnitli" yollar vasitəsilə əlaqələndirmək olar. Bu, əhalinin şəhərlərarası və şəhərdaxili sərnişin daşımalarına olan tələbatının vaxtında və yüksək keyfiyyətlə yerinə yetirilməsinə imkan yaradar, Respublika ərazisində və qeyd edilən şəhərlərin rayonlarında yerüstü nəqliyyat vasitələrindəki gərginliyi və onların ətraf mühitə səpələdiyi zərərli birləşmələri xeyli azaltmış olardı.

Maqnitoplanların hərəkəti üçün hətta 2 mərtəbəli estakadalar da nəzərdə tutula bilər: birinci mərtəbədə kiçik sürətli və bəzi rayon mərkəzlərinin yaxınlığından keçdikdə dayanmaq üçün yaxın dayanacaqları nəzərdə tutulacaq qatarlar üçün; ikinci mərtəbədə isə yüksək sürətli maqnitoplanların hərəkəti üçün. Bu yeni nəqliyyat növü ilə Beynəlxalq hava limanlarını əlaqələndirməklə H.Əliyev Beynəlxalq hava limanını "düyün" hava limanına (HUB) çevirmək olar və uzaq məsafələrə sərnişin daşımalarının müntəzəmliyini təmin etmək məqsədilə sərnişinləri bir yerə yığaraq, onları istədikləri istiqamətlərə yola salmaq üçün şərait yaratmaq olar.

## REFERENCES

1. **Demirezer T,** 2010. Türkiye'de hızlı tren projeleri ve proje yapıları. TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara. Göker A, 1996. Yüksek Hızlı Tren TÜBİTAK Raporu. Ankara, Türkiye. 2-16 s. *(in Turkish)*
2. **Solak K,** 2011. Raylı sistem alternatifleri ile manyetik alan üzerinde hareket eden trenlerin (maglev) çok ölçütlü değerlendirme yöntemi ile karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi *(in Turkish)*
3. **Yaghoubi H.** The most important advantages of magnetically levitated trains. In Proceedings of the 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP 11), *American Society of Civil Engineers (ASCE) Publisher,* Nanjing, China, 2011. *(in English)*
4. U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2001. Maglev Deployment Program Final Programmatic Environmental Impact Statement, John A. Volpe National Transportation Systems Center, DOT-VNTSC- FRA-00-04, Volume I, Springfield, Virginia, pp. 243-245 *(in English)*
5. **Yau J.D.** (2009). Aerodynamic response of an EMS-type maglev vehicle running onflexible guideways, 10th International Conference on Flud Control, Measurements, and Visualization, Moscow, Russia. *(in English)*
6. **Yaghoubi H. & Ziari H.** (2011). Development of a maglev vehicle/guideway system interaction model and comparison of the guideway structural analysis with railway bridge structures. ASCE, *Journal of Transportation Engineering,* Vol 137, No. 2, pp. 140-154 *(in English)*
7. **Witt M. & Herzberg S.** (2004). Technical-economical system comparison of high speed railway systems. The 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Shanghai, China. *(in English)*
8. **Tielkes T.** (2006). Aerodynamic aspects of maglev systems, Proceedings of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Dresden, Germany *(in English)*
9. **Behbahani H. & Yaghoubi H.** (2010). Procedures for safety and risk assessment of maglev systems: a case-study for long-distance and high-speed maglev project in Mashhad Tehran route. The 1st International Conference on Railway Engineering, High-speed Railway, Heavy Haul Railway and Urban Rail Transit, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, China Railway Publishing House, pp. 73-83, ISBN 978-7-113-11751- 1 *(in English)*
10. **Hyung S.H., Chang H.K., Jong M.L., Chang W.L.** System integration of a non-contact conveyer using magnetic levitation technology," Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on, pp.708,712, April 2011 *(in English)*
11. **Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V.** Halbach structures for permanent magnets bearings. Progress In Electromagnetic Research. M, 2010. Vol. 14, pp. 263–277 *(in English)*
12. **Gasymov A.A.** Vliyanie sistemy menedzhmenta kachestva na uroven uslug v sfere gruzovyh aviaperevozok. *Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii,* 2018, T. 10, № 2, c. 106-112 *(in Russian)*

# Strengthening of Parts of Special-purpose Products by Diffusion Metallization

**A.G. Guseinov, I.A. Nazarov, Sh.A. Asadov**

*Azerbaijan Technical University (Huseyn Javid ave. 25, Baku, AZ 1148, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Asadov Shamkhal / e-mail: shamxal.esedov@aztu.edu

**Abstract**

In article considers the issues of increasing the longevity and durability of special products using diffusion metallization method. By applying a coating to the working surface of parts of special products with modern methods, their longevity and reliability are ensured, and at the same time, quality indicators are increased. It is known that special-purpose products are operated under extreme conditions, and therefore their details are exposed to various types of food, corrosion and impressing factors. For this reason, during the production of special products, it is advisable to apply coating resistant to wear and corrosion to their parts by diffusion metallization. As the object of study, steel samples of 50PA, 30XH2MΦA, 38XH3MA, 30XHMΦA, 38XH3MFA were selected, which were used in the manufacture of parts of special purpose products.

**Keywords:** erosion, diffusion, hardness, coating, durability, wear.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_54_63

***Received*** *08.02.2022*
***Revised*** *19.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Guseinov A.G., Nazarov I.A., Asadov Sh.A.*
[Strengthening of parts of special-purpose products by diffusion metallization]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 54-63 *(in Azerbaijani)*

# Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin diffuziya metallaşdırılma üsulu ilə möhkəmləndirilməsi

**Ə.G. Hüseynov, İ.Ə. Nəzərov, Ş.A. Əsədov**

*Azərbaycan Texniki Universiteti (Hüseyn Cavid pr. 25, Bakı, AZ1148, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**
Əsədov Şamxal / e-mail: shamxal.esedov@aztu.edu.az

**Xülasə**

Məqalədə diffuziya metallaşdırma üsulundan istifadə etməklə xüsusi təyinatlı məhsulların uzunömürlülüyünün və möhkəmliyinin artırılması məsələlərinə baxılmışdır. Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin işçi səthinə müasir üsullarla örtük çəkməklə onların uzunömürlülüyü və etibarlığı təmin edilir, eyni zamanda keyfiyyət göstəriciləri artır. Məlumdur ki, xüsusi təyinatlı məhsullar ekstremal şəraitə istismar olunur və buna görə də onların detalları müxtəlif növ yeyilmələrə, korroziyaya və təsir edici faktorlara məruz qalırlar. Bu səbəbdən, xüsusi təyinatlı məhsulların istehsalı zamanı onların hissələrinə yeyilməyə və korroziyaya davamlı örtüklərin diffuziya metallaşdırma üsulu ilə çəkilməsi məqsədəuyğundur. Tədqiqat obyekti kimi xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin hazırlanmasında istifadə edilən 50PA, 30XH2MФA, 38XH3MA, 30XHMФA, 30XPA, 38XH3MFA polad nümunələri seçilmişdir.

**Açar sözlər:** eroziya, diffuziya, bərklik, örtük, uzunömürlülük, yeyilmə.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_54_63

**УДК:** 622.276:658:58

# Армирование деталей изделий специального назначения методом диффузионной металлизации

**А.Г. Гусейнов, И.А. Назаров, Ш.А. Асадов**

*Азербайджанский Технический университет (пр. Гусейна Джавида, 25, Баку, AZ1148, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Асадов Шамхал / e-mail: shamxal.esedov@aztu.edu.az

**Аннотация**

В статье рассматриваются вопросы повышения долговечности специальных изделий с использованием метода диффузионной металлизации. За счет нанесения покрытия на рабочую поверхность деталей специальных изделий современными методами повышаются их показатели качества. Известно, что изделия спецназначения эксплуатируются в экстремальных условиях, и поэтому их детали подвергаются различным видам износа, коррозии и воздействующим факторам. По этой причине при производстве специальных изделий целесообразно наносить на их детали покрытие, стойкое к износу и коррозии, методом диффузионной металлизации. В качестве объекта исследования были выбраны образцы стали 50PA, 30XH2MФA, 38XH3MA, 30XHMФA, 38XH3MFA, которые использовались при изготовлении деталей изделий специального назначения.

**Ключевые слова:** эрозия, диффузия, твердость, покрытие, долговечность, поглощение.

**Giriş**

Maşınqayırma sənayesinin sürətlə inkişafı bir mənalı olaraq, yeni növ örtüklərin alınması və onun istehsalatda tətbiqi ilə əlaqədardır. Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin işçi səthinə müasir üsullarla örtük çəkməklə onların uzunömürlülüyü və etibarlığı təmin edilir və eyni zamanda keyfiyyət göstəriciləri artır. Məlumdur ki, xüsusi təyinatlı məhsullar ekstremal şəraitə istismar olunur və buna görə də onların detalları müxtəlif növ yeyilmələrə, korroziyaya və müxtəlif təsir edici faktorlara məruz qalırlar. Bu səbəbdən, xüsusi təyinatlı məhsulların istehsalı zamanı onların hissələrinə yeyilməyə və korroziyaya davamlı örtüklərin çəkilməsi məqsədəuyğundur.

Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin göstərilən xüsusiyyətini təmin edən örtüyün diffuziya metallaşdırılma üsulu ilə çəkilməsi məqsədə uyğundur. Tədqiqat obyekti kimi xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin hazırlanmasında istifadə edilən 50PA, 30XH2MΦA, 38XH3MA, 30XHMΦA, 30XPA, 38XH3MFA polad nümunələri seçilmişdir.

**İşin məqsədi**

Xüsusi təyinatlı məhsullarının hissələrinin işçi səthinə diffuziya metallaşdırma üsulu ilə örtük çəkməklə keyfiyyət göstəricilərini artırmaqla, etibarlılığının təmin edilməsidir.

Diffuziya metallaşdırma üsulu ilə örtük çəkilməsi qurğuları və avadanlıqları haqqında [1] geniş məlumat verilmişdir. Detalların diffuziya metallaşdırılması üsulu ilə legirləyici elementlərlə doydurulması, həm də onların həndəsi ölçülərinin dəyişməsinə də səbəb olur və artırır. Bu da imkan verir ki, yeyilmiş hissələr bərpa edilsin.

Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin səth qatının diffuziya metallaşdırılması, karbid-xromlama ilə bərpası və möhkəmləndirilməsinin tətbiqi [2] verilmiş, qarışığın tərkibi və doydurma prosesinin rejimləri göstərilmişdir.

Müasir dövrdə atıcı silahların etibarlığının analizləri göstərir ki, onların resursu presizion hissələrin qızması və yeyilməyə davamlığının zəif olması ilə məhdudlanır. Presizion birləşmələrin resursunun aşağı olması ilk növbədə onun istismarının, texniki qulluğunun aşağı səviyyədə olması və emal texnologiyasında örtük çəkmə proseslərinin mükəmməl olmamasıdır.

Xüsusi təyinatlı məhsulların hissələrinin yeyilməyə davamlığı, onun səthi bərkliyindən asılıdır. Atıcı silahların presizion hissələrinin sıradan çıxmasının əsas səbəblərindən biri onların qızması nəticəsində deformasiya olunması və onlara eroziyon yeyilmə, barıt qazının yüksək təzyiqlə təsiri, oksidləşdirici mühit və hər növ hava şəraiti və istismar şəraitində qızması nəticəsində detalların həndəsi ölçülərinin dəyişməsi; qalıq gərginliyi, austinitin parçalanması və bir sıra digər amillərdir.

**Məsələnin qoyuluşu**

Xüsusi təyinatlı atıcı silahların hissələrinin yeyilməsinin qanunauyğunluqları [3] müəllifi tərəfindən araşdırılmışdır. Tədqiqatların nəticələri göstərir ki, lülənin yeyilməsi diametrə görə maksimum 300÷360 mkm-ə çata bilər və bu da əsasən lülənin daxili səthində müşahidə olunur.

Atıcı silahların lüləsinin yeyilmə xüsusiyyətlərinin tədqiqatları göstərir ki, [2], yeyilmə sahəsinin oxboyu istiqamətində ara məsafəsi 5÷25 mkm və dərinliyi 50÷60 mkm olan kiçik qüsurlar müşahidə edilir. Bu araşdırmaları təsdiqləmək üçün, atıcı silahlar və təmir fonduna daxil olan 25 ədəd detal seçilmişdir. Hissələrin mikrometrajı aparılmış, bundan əlavə yeyilmənin qiymətini analiz etmək üçün TLY-

ROND cihazında dairəqramlar çəkilmişdir. Nəticələr göstərir ki, yeyilmənin orta statistik qiyməti lülə üçün dərinliyə görə 120 mkm-dir. Atıcı silahların presizion hissələrinin yeyilmiş səthlərində kiçik qüsurlarla yanaşı, 80-60 mkm-ə çatan çuxurlar və çatlar müşahidə edilir. Belə növ yeyilmənin mövcudluğu barıtın tərkibindəki hissəciklərin detalın materialına təsirindən irəli gəlir.

Tədqiqatların nəticələri göstərir ki, lülənin daxili səthləri erroziya, frettinq korroziya, korroziya-mexaniki, mexaniki-kimyəvi yeyilmələrə də məruz qalır.

Bu səbəbdən, atıcı silahların presizion hissələrinin aqressiv mühitdə istismar zamanı işçi səthlərinin istiliyə və yeyilməyə qarşı müqavimətini təmin edən materiallar və ya örtüklər seçilməsi çox vacibdir.

Mövcud örtükçəkmə texnologiyalarının analizi bizə bu problemi həll etmək üçün ən effektiv yollardan biri olan diffuziya metallaşdırma üsulunu seçməyə imkan verir. Presizion birləşmələrin istehsalı zamanı resursunun artırılması və həmin hissələrin vakuumla diffuziya xromlama üsulu ilə bərpası və möhkəmliyinin artırılması [3, 4] müəlliflər tərəfindən tədqiq edilmişdir. Bu tədqiqatlarda göstərilir ki, yeni hissələrlə müqayisədə atıcı silahların presizion hissələrinə diffuziya ilə örtüklərinin çəkilməsi, onların resursunu 2-4 dəfə artırır.

Ancaq, müasir dövrdə tətbiq edilən diffuziya xromlama və titanlama üsullarının yüksək sərtliyə, lakin texnoloji prosesdən sonra mexaniki emala ehtiyac vardır. Bu da istehsalın maya dəyərini artırır.

Çox böyük olmayan diffuziyalı qatın qalınlığı və yüksək bərkliyə malik olması mexaniki emalın əmək tutumunun artmasına səbəb olur. Vakuumda diffuziya xromlama metodu ilə örtük çəkilmiş və möhkəmləndirilmiş presizion hissələrin mexaniki emalına [5] işi həsr olunmuşdur. Burada həmin örtüklərin istehsalatda mexaniki emalının optimal rejimləri verilmişdir.

Atıcı silahların presizion hissələrin möhkəmliyinin artırılması zamanı doydurulan elementlərin diffuziya dərinliyinin və möhkəmləndirilən qatın qalınlığınının artırılması aktual məsələlərdən biridir. Bu problemin həlli atıcı silahların istismar göstəricilərinin artmasına və məhsulların keyfiyyətinin yüksəlməsinə gətirib çıxaracaqdır. Bu problemin həlli yollarından biri, polad məmulatların səthinə bir sıra elementlərlə, həmçinin xrom və titanlarla müqayisədə daha çox dərinliyə diffuziya edə bilən kiçik ölçülü atomlarla diffuziya doydurulması metodlarının tətbiq olunmasıdır.

Bor, xrom və nikel elementlərindən ibarət olan qarışıqla doydurulan məmulatların səthi kompleks şəkildə yüksək fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərə malik ola bilər [6-10].

Bu günə kimi, atıcı silahların presizion hissələrinin diffuziya metallaşdırılması metodu ilə möhkəmliyinin artırılması üzrə tədqiqatlar aparılmayıb. Diffuziya metallaşdırılması prosesi Azərbaycan Texniki Universitetinin "Xüsusi təyinatlı məhsulların texnologiyası" elmi-tədqiqat laboratoriyasında olan CHB-1.3.1/16.И.1 qurğusunda aparılmışdır.

Eksperimentlərin aparılması üçün aşağıda qeyd edilən polad nümunələr seçilmişdir ki, hal-hazırda atıcı silahların istehsalında istifadə olunur. 50PA, 30XH2MΦA, 38XH3MA, 30XHMΦA, 30XPA, 38XH3MFA markalı poladlardan olan detallar və nümunələr araşdırılmışdır.

Polad markaların seçilməsi, onların legirləyici elementlərinin alınan diffuziyalı qatın qalınlığına və detalın xətti ölçülərinin artmasına təsir səviyyəsini araşdırmaq məqsədi ilə aparılmışdır (cədv. 1, 2).

**Məsələnin həlli**

Möhkəmliyi artırılmış detalları və nəzarət nümunələrini poladdan hazırlanmış silindrik konteynerə yerləşdirirlər və doydurulan qarışığı elə səpirlər ki, konteyner divarı ilə detalın arasındakı məsafə ən azı 10 mm, detallar arası məsafə isə 5÷8 mm olsun.

Borxromlamada toz qarışıqları üçün ilkin istifadə edilmiş materiallar aşağıdakılardır: xrom tozu X97 (ГОСТ 5905-79) 0,07÷0,2 mm fraksiyalı; bor karbidli pardaq tozu $B_4C_3H$ (ТУ 2-036-879-81); sink tozu ПЦ-2 (ГОСТ 12601-76); alüminium oksidi Al2O3 (ГОСТ 3136-76). Prosesdə aktivləşdirici olaraq, $NaB_4O_7$ (ГОСТ 4199-76) və kalium florid KF (ГОСТ 20348-75) istifadə edilmişdir [10, 11]. Qarışdırılmamışdan öncə, xrom və bor karbidi tozları 300℃ temperaturda 3 saat müddətində alüminium oksidi 700℃-də 3 saat müddətində, bor və kalium florid 200℃ temperaturda 2 saat müddətində qurudulurlar. Qurudulduqdan sonra göstərilən nisbətdə miqdarını nəzərə alaraq, tozları qarışdırırlar. Hazır qarışıq hermetik konteynerdə saxlanılır.

Texnoloji prosesin yerinə yetirilməsi metodu ilə diffuziya metallaşdırma prosesi aşağıdakı qaydada həyata keçirilmişdir: metallaşdırma üçün hissələrin hazırlanması və nümunələrin ölçülməsi; vakuum qurğusunun konteynerlərində hissələrin yerləşdirilməsi və konteynerin hermetizasiyası; qurğunun işə salınması və işçi temperaturun çatdırılması; sobanın boşaldılması; açıq hava şəraitində konteynerlərin qurudulması və ayrılması; qatışıqların təmizlənməsi; detal və nəzarət nümunələrinin təmizlənməsi və ölçülməsi [4].

Atıcı silahların hissələrinin səthi bərkliyi, örtüyün qalınlığı üzrə mikro-bərkliyin paylanması rentgen və mikrospektral analizlə və örtüklərin yeyilməsi [4] metodikası ilə müəyyən edilmişdir.

Atıcı silahların yeyilmiş presizion hissələrinin bərpası yeni hazırlanmış hissələrinin səthi bəkliyinin artırılması üçün seçilən diffuziya metallaşdırılması hissələrinin xətti ölçülərini bərpa etməklə yanaşı, daxili diffuziya hesabına səthlərin möhkəmliyini də artırmağa şərait yaradır.

Diffuziya metallaşdırılmasında müxtəlif kombinasiyalı doydurucu elementlərdən və xətti ölçülərin dəyişdirilməsi üçün aktivləşdiricilərdən ibarət olan müxtəlif tərkibli doydurucu qatışığı tətbiq etməyə imkan verir [4].

Bu zaman xrom, nikel və bor ilə ikikomponentli və çox komponentli texnoloji proseslər tədqiq edilmişdir. Əsas parametrlər kimi, doydurulma temperaturu və işçi temperaturunda saxlama müddəti götürülür.

Atıcı silahların presizion hissələrinin səthi möhkəmliyinin artırılması və presizion hissələrinin bərpası üçün xətti ölçülərdə müşahidə olunan artımın temperatur və saxlama müddətindən asılılığı öyrənilmişdir.

Çökdürülən elementlərin əsaslandırılması və onun tərkibindəki bu və ya digər komponentlərin tətbiq imkanlarını müəyyən etmək üçün bir sıra dəqiqləşdirici təcrübələr aparılmışdır.

Nəşrlərin analizi və ilkin eksperimentlərin nəticələri əsasında atıcı silahların presizion hissələrinin diffuziya metallaşdırılma metodu ilə bərpası və möhkəmliyinin artırılması üçün aşağıdakı materiallar seçilmişdir:

Bor karbid - 30 %, Cr - 45 %, bor - 4 %, sink - 4%, aktivator - 3 %, qalanı - alüminium oksid [4].

Diffuziya texnoloji prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişməsinin və diffuziyalı qatın qalınlığının temperaturdan və prosesin aparılma müddətindən asılılığı (şək. 1-4)-də verilmişdir.

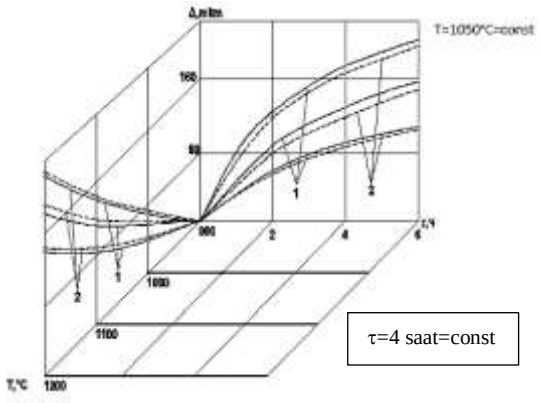
**Cədvəl 1 –** Diffuziyaya uğradılmış poladların tərkibi
**Table 1 –** Composition of diffused steels

| Poladlar | Kimyəvi elementlərin tərkibi. kütlə % | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Mn | Cr | Ni | Mo | W | Y | Co | Ti | Cu | Si | P | $\delta$ |
| 50PA | 0,42÷0,50 | 0,50÷0,80 | 0,25 | 0,3 | - | - | - | - | - | 0,3 | 0,17÷0,37 | 0,035 | 0,04 |
| 30XH2MΦA | 0,14÷0,20 | 0,25÷0,55 | 1,35÷1,64 | 4,0÷4,4 | - | - | 0,30÷0,40 | - | - | - | 0,17÷0,37 | 0,025 | 0,025 |
| 38XH3MA | 0,28÷0,34 | 0,80÷1,10 | 0,80÷1,10 | 3,30 | | - | - | - | - | 0,3 | 0,80÷1,20 | 0,025 | 0,025 |
| 30XHMΦA | 0,76÷0,83 | 0,17÷0,28 | 0,20 | 0,20 | - | - | - | - | - | 0,2 | 0,17÷0,33 | 0,025 | 0,018 |
| 30XPA | 0,95÷1,0 | 0,20÷0,40 | 1,30÷1,65 | 0,30 | - | - | - | - | - | 0,25 | 0,17÷0,37 | 0,027 | 0,02 |
| 38XH3MFA | 0,90÷1,05 | 0,80÷1,10 | 0,90÷1,20 | 0,035 | 0,30 | 1,20÷1,60 | 0,05 | - | 0,03 | 0,3 | 0,15÷0,35 | 0,030 | 0,03 |
| 25X5MA | 0,22÷0,29 | 0,5 | 4,5÷6,0 | 0,6 | 0,45÷0,60 | 0,3 | 0,05 | - | 0,03 | 0,2 | 0,5 | 0,025 | 0,025 |
| P18 | 0,70÷0,80 | 0,4 | 3,8÷4,4 | 0,35 | 1,0 | 17,0÷18,5 | 1,0÷1,4 | 0,6 | - | 0,45 | - | 0,030 | 0,03 |

**Cədvəl 2 –** Diffuziya metallaşdırma prosesindən sonra səthin metalloqrafik və keyfiyyət göstəriciləri
**Table 2 –** Metallographic and quality indicators of the surface after diffusion metallization

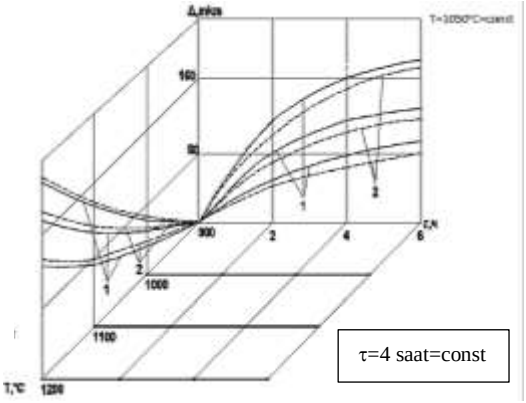
| Poladlar | Xətt ölçülərinin dəyişməsi | Qatın qalınlığı | Səthin kələ-kötürlüyü | Mikrobərklik | Səthdən müxtəlif dərinlikdə örtüyün qatılığı, rentgenstrukturu və faza tərkibi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Kələ-kötürlük | 10 | 50 | 100 | 120 | 150 |
| 50PA | 180÷1,94 | 356÷368 | 1,2÷1,6 | 2120÷2126 | $(Fe,Cr)_2B$+(Fe,Cr)B | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$+αFe | $(Fe,Cr)_2B$+αFe+$Fe_3C$ |
| 30XH2MΦA | 162÷176 | 324÷352 | 1,6÷2,4 | 1850÷1860 | - | - | - | - | - | - |
| 38XH3MA | 192÷202 | 384÷396 | 1,4÷1,8 | 2080÷2086 | $(Fe,Cr)_2B$+(Fe,Cr)B | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$+αFe | $(Fe,Cr)_2B$+αFe+$Fe_3C$ |
| 30XHMΦA | 173÷186<br>224÷230 | 342÷374<br>448÷462 | 1,5÷1,8<br>1,8÷2,4 | 1820÷1840<br>1560÷1570 | (Fe,Cr)B+(Fe,Cr)B | (Fe,Cr)B | (Fe,Cr)B | $(Fe,Cr)_2B$ | $(Fe,Cr)_2B$+αFe | $(Fe,Cr)_2B$+αFe+$Fe_3C$ |
| 30XPA | 232÷238 | 460÷474 | 1,4÷2,0 | 1620÷1625 | - | - | - | - | - | - |
| OXH3MFA | 232÷246 | 462÷480 | 1,6÷1,8 | 1910÷1916 | - | - | - | - | - | - |
| 25X5MA | 185÷188 | 356÷370 | 1,4÷1,8 | 1570÷1575 | - | - | - | - | - | - |
| P18 | 180÷184 | 350÷364 | 1,2÷1,6 | 2060÷2084 | - | - | - | - | - | - |
| 25X5MA | 244÷248 | 486÷492 | 1,2÷1,6 | 2025÷2030 | | | | | | |
| 40X | 182÷186 | 362÷365 | 1,5÷1,8 | 1820÷1830 | - | - | - | - | - | - |

**Qeyd:** Diffuziya metallaşdırma rejimi T=1100℃, $\tau$ =4.




**Şəkil 1 – 1**-50PA(bütöv xətlər), **2**-30XH2MΦA(qırıq-qırıq xətlər) markalı poladlardan hazırlanmış detalların diffuziya metallaşdırılma prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişilməsi (Δ) və diffuziya qatının qalınlığının (Δ) temperatur (T) və prosesin aparılma müddətindən ($\tau$) asılılıq qrafiki göstərilmişdir.

**Figure 1 –** The graph shows the dependence of linear dimensions of the parts in diffusion metallization of details made of steel **1**-50PA(whole lines), **2**-30XH2MΦA (cut-off lines) and the temperature (T) of the diffusion layer thickness (Δ) and the duration ($\tau$) of the process.




**Şəkil 2 – 1**-38X3MA (bütöv xətlər), **2**-30XHMΦA (qırıq-qırıq xətlər) markalı poladlardan hazırlanmış detalların diffuziya metallaşdırılma prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişilməsi (Δ) və diffuziya qatının qalınlığının (Δ) temperatur (T) və prosesin aparılma müddətindən ($\tau$) asılılıq qrafiki göstərilmişdir.

**Figure 2 –** The graph shows the dependence of linear dimensions of the parts in diffusion metallization of details made of steel **1**-38X3MA (whole lines), **2**-30XHMΦA (cut-off lines) and the temperature (T) of the diffusion layer thickness (Δ) and the duration ($\tau$) of the process.

Tədqiqatlar göstərir ki, detalların səthinin 900℃-dən aşağı temperaturda doydurulması xətti ölçülərin (2-6 mkm) bir az artmasına gətirib çıxarır. Temperaturun 1050-1150℃-ə qədər artırılması tədqiq olunan nümunələrin xətti ölçülərinin 160-180 mkm və daha çox artmasına gətirib çıxarır. 1000℃-dən aşağı olan temperaturlarda bərpa olunan hissələrin xətti ölçülərinin artımı atıcı silahların presizion hissələrinin yeyilməyə davamlılığının tam bərpası və səthin möhkəmliyinin təmin edilməsi üçün kifayət deyil. 1200℃-dən yuxarı olan temperaturda detalların səthlərinin doydurulması, qatışıq elementlərinin detala yapışmasına və birləşməsinə gətirib çıxarır.

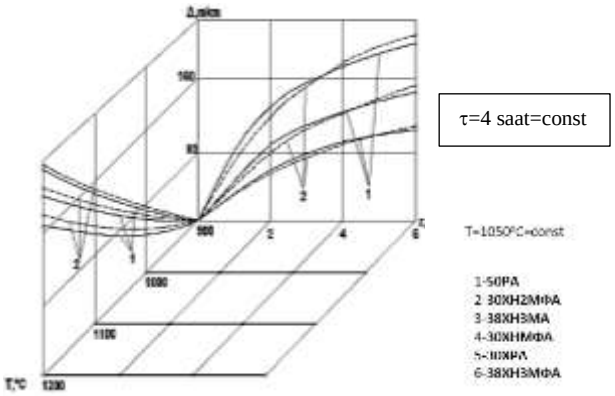
Buna görə də, atıcı silahların presizion hissələrinin diffuziya metallaşdırması metodu ilə texnoloji prosesi 1200℃-dən yuxarı temperaturda artırmaq məsləhət deyil [6].

Atıcı silahların presizion hissələrinin möhkəmləndirilmə prosesi 1100-1200℃ temperaturda aparılması zamanı tələb olunan ölçü və diffuziya qatın qalınlığını əldə etmək mümkün olur.

Şəkil 3-də 30XPA (bütöv xətlər) və 38XH3MFA (ştrixlərlə çəkilmiş xətlər) polad detalların diffuziya metallaşdırılma prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişilməsi və diffuziya qatının qalınlığının (Δ) temperaturdan və prosesin aparılma müddətindən ($\tau$) asılılıq qrafiki göstərilmişdir.

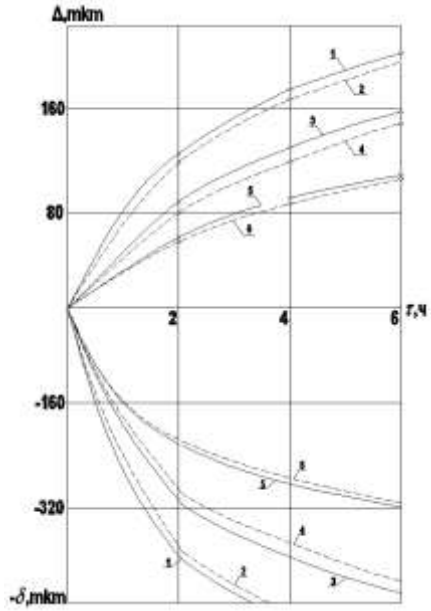
Diffuziya metallaşdırılması ilə möhkəmliyin artırılmasında texnoloji prosesin müddətinin xətti ölçülərinin və ümumi diffuziya qatın qalınlığına təsirini T= 1100℃ temperaturda 2-6 saat qalma müddətində tədqiq edilmişdir.

Tədqiqatlar nəticəsində təyin olunmuşdur ki, nümunələrin xətti ölçüləri 2-5 saat doydurulma müddətində intensiv olaraq dəyişir. Doyma prosesinin müddəti 4 saatdan artıq olduqda, nümunələrin ölçüləri artır, lakin prosesin əvvəlindəki kimi intensiv olmur. Bu da doydurulan qatışığın aktivkiyinin aşağı enməsi ilə izah olunur. Bundan başqa diffuziyalı qatın ümumi dərinliyinin kəskin şəkildə aşağı düşməsinə səbəb olur.




**Şəkil 3 –** **1**-30XPA (bütöv xətlər), **2**-38XH3MΦA (qırıq-qırıq xətlər) markalı poladlardan hazırlanmış detalların diffuziya metallaşdırılma prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişilməsi (Δ) və diffuziya qatının qalınlığının (Δ) temperatur (T) və prosesin aparılma müddətindən ($\tau$) asılılıq qrafiki göstərilmişdir.

**Figure 3 –** The graph shows the dependence of linear dimensions of the parts in diffusion metallization of details made of steel **1**-30XPA (whole lines), **2**-38XH3MΦA (cut-off lines) and the temperature (T) of the diffusion layer thickness (Δ) and the duration ($\tau$) of the process.




**Şəkil 4** – Diffuziya metallaşdırma prosesində hissələrin xətti ölçülərinin dəyişməsinin (Δ) və daxili diffuziya qatının (δ) zamandan ($\tau$) asılılığı qrafiki.

**Figure 4 –** Graph of the change in the linear dimensions (Δ) of parts in the process of diffusion metallization and the time ($\tau$) dependence of the internal diffusion layer(δ).

Beləliklə, atıcı silahların hissələrinin səthinin bərpası və möhkəmləndirilməsi zamanı texnoloji prosesin müddətinin 3÷4 saata qədər olması məqsədə uyğundur.

Daxili diffuziyanın dərinliyinin tədqiqi şək.4-də göstərilmişdir. Şəkil 4-də görünür ki, diffuziya prosesində qatın qalınlığının 1/3-i hissələrin həndəsi ölçülərinin, 2/3-si isə hissələrin daxilinə diffuziya etmişdir.

Örtük çəkilmiş hissələrin tərkibi və diffuziya prosesindən sonra metalloqrafik tədqiqatların nəticələrinin təhlili cədv. 1 və 2-də verilmişdir. 1 və 2 məlumat cədvəlindən görünür ki, poladın tərkibindəki karbon alınan qatın qalınlığına əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir. 30XH2MΦA, 38XH3MA, 30XHMΦA markalı poladlardakı molibdenin mövcudluğu örtüyün qalınlığının azalmasına gətirib çıxarır. 38XH3MFA poladında örtüyün qalınlığının kəskin azalması bu materialın tərkibində volframın yüksək miqdarda olması ilə əlaqədardır.

Bununla bərabər, 30XH2MΦA poladı üçün bu çatışmamazlıq nikelin həddindən artıq olması ilə kompensasiya edilir. Böyük qalınlığa malik olan diffuziyalı örtüklər daha az legirləyici poladlarda, həmçinin 38XH3MA poladda əldə edilmişdir. Atıcı silahların presizion hissələrinin bərpası və möhkəmləndirilməsi nöqteyi-nəzərdən kompleks diffuziya metodu ilə doydurulması zamanı əldə olunan ölçü dəyişmələrinin məlumatları xüsusi maraq doğurur (bax. cədvəl 2 və şək. 1-4). Cədvəl 2-də göründüyü kimi, nümunələrin xətti ölçülərinin artması ilə əldə olunan diffuziya örtüyün qalınlığı arasında müəyyən bir əlaqə var. Nümunənin ölçüsünün artması, diffuziyalı təbəqənin bütün qalınlığının 1/3-nə bərabərdir. Bu halda, hər hansı detalın bərpası üçün metallizasiya rejimlərini seçərkən, verilən qatışıqda ölçülərin artım qiymətləri ilə diffuziyalı qatın qalınlığı arasında optimal münasibətə üstünlük vermək

lazımdır. Çünki, daha əvvəl müəyyən edilmişdir ki, örtüyün qalınlığının, həmçinin doydurulma prosesinin istənilən temperaturunda qalma müddətinin artması ilə yaranan kövrəkliyi kəskin şəkildə artır.

Poladlardan diffuziya metallaşdırmaya məruz qalmış diffuziyalı qat aydın görünən iynəvari struktura malik deyil, çünki iynələr tam örtüyə daxil olur. 50PA və 30XH2MΦA poladlarında qat altı xırda karbid müşahidə olunur. 38XH3MA və 30XHMΦA poladlarındakı örtüklərin strukturu 30XPA və 38XH3MFA poladlarının örtüklərinin strukturuna analojidir, həmçinin burada qat altı borid toru əmələ gəlmir.

Polad 30XH2MΦA üzərində olan örtüklər xırda dənəvari quruluşa malikdir. 50PA daha az davamlılığa malik bir örtük əldə edilmişdir. Diffuziyalı qat olduqca aydın şəkildə görünür və bərabər uzunluqda olan iynələrdən ibarətdir. Qeyd etmək lazımdır ki, 38XH3MFA poladının azotlanmış hissələrində karbid əmələ gəlir. Poladlarda diffuziyalı karbid örtüklər bərabər ölçülü qatla paylanılır.

Kompleks diffuziya metodu ilə möhkəmləndirilən presizion hissələrin səthi bərkliyi H100=1000÷1800Mpa-dır. 50PA və 30XHMΦA poladlarda örtüklərin mikrobərkliyi bir qədər aşağıdır (müvafiq olaraq, 1200 və 1500 MPa). Ən yüksək sərtliyə malik örtüklər 38XH3MA (20000MPa) poladında alınır. Bunu onunla izah etmək olar ki, bu poladların diffuziya təbəqəsindəki mürəkkəb dəmir boridlərindən əlavə, volfram karbidi, molibden və digər legirləyici elementlər əmələ gəlir.

Bütün markalı poladlarda diffuziyalı qatın dərinliyi üzrə mikrobərkliyin dəyişməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir. Temperaturun təsiri və diffuziya metallaşdırma prosesi zamanı möhkəmləndirmə prosesi müddətinin legirləyici poladlardan hazırlanmış detalların xətti ölçülərinin dəyişilməsinə təsir göstərir ki, xüsusi təyinatlı məhsulların presizion hissələrinin keyfiyyət göstəricilərini yüksəltmək üçün tələb olunan ölçülərin artımını aşağıdakı şərtlərdə əldə etmək mümkündür: temperatur 1050÷1150℃; saxlama müddəti 3 ÷4 saat.

Nümunələrdə örtüklərin mikrobərkliyi istehsal zavodlarında hazırlanmış texniki tələblərin qiymətlərindən aşağı deyil, bu da xüsusi təyinatlı məhsulların presizion hissələrinin kompleks diffuziya metallaşdırma üsulunun tətbiqinə şərait yaradır.

**Nəticə**

İlkin analizlərə əsasən deyə bilərik ki, atıcı silahların presizion hissələrinin sıradan çıxmasının səbəbləri olaraq detalların qızması nəticəsində deformasiya olunması, hissələrin eroziyon yeyilməyə məruz qalması nəticəsində detalların həndəsi ölçülərinin dəyişməsi, qalıq gərginliyinin yaranması, austenitin parçalanması və s. olduğu müəyyən olunmuşdur. Ədəbiyyat analizi nəticəsində müəyyən olunub ki, xüsusi təyinatlı məhsullarda diametr üzrə yeyilmə maksimum 300-360 mkm-ə çata bilər. Atıcı silahların presizion hissələrinin yeyilmiş səthlərində kiçik qüsurlarla yanaşı, 80-60 mkm-ə çatan çuxurlar və çatlar müşahidə edilir. Belə növ yeyilmənin mövcudluğu barıtın tərkibindəki hissəciklərin detalın materialına təsirindən irəli gəlir. Tədqiqatların nəticələri göstərir ki, atıcı silahların presizion hissələrinin işçi səthləri erroziya, frettinq korroziya, korroziya-mexaniki, mexaniki-kimyəvi yeyilmələrə də məruz qalır.

50PA və 30XH2MΦA poladlarında qat altı xırda karbid müşahidə olunur. 38XH3MA və 30XHMΦA poladlarındakı örtüklərin strukturu 30XPA və 38XH3MFA poladlarının örtüklərinin strukturuna analojidir, həmçinin burada qat altı borid toru əmələ gəlmir. Polad

30XH2MΦA üzərində olan örtüklər xırda dənəvari quruluşa malikdir. 50PA daha az davamlılığa malik bir örtük əldə edilmişdir. Diffuziyalı qat olduqca aydın şəkildə görünür və bərabər uzunluqda olan iynələrdən ibarətdir. 38XH3MFA poladının azotlanmış hissələrində karbid əmələ gəlir. Poladlarda diffuziyalı karbid örtüklər bərabər ölçülü qatla paylanılır.

## REFERENCES

1. **Guseinov A.G., Kyazimova H.A.** Diffuzionnaya metallizaciya dlya povysheniya iznosostojkosti detalej gusenichnyh dvizhitelej. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, № 01 *(in Russian)*
2. **Belous V.A., Ermolenko I.G., Zadneprovskij Yu.A., Lomino N.S**. Kombinirovannoe uprochnenie detalej uzlov treniya vakuumno-dugovym metodom. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya *«Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie»*. 2016, №4, s. 93-99 *(in Russian)*
3. **Dubinin G.N.** Diffuzionnoe hromirovanie splavov. M.: «*Mashinostroenie*», 1964, 451 s. *(in Russian)*
4. **Guseinov A.G.** Rabotosposobnost detalej mashin i apparatury, vosstanovlennyh diffuzionnoj metallizaciej. *Vestnik mashinostroeniya*, 2001, № 02 *(in Russian)*
5. **Guseinov A.G.** Opredelenie tolshchiny diffuzionnogopokrytiya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin. *Vestnik mashinostroeniya*, 2003, № 12 *(in Russian)*
6. **Castle A.R. and Gabe D.R.** Chromium diffusion coatings // International Materials Reviews. 1999, v. 44, N 2, p. 37-58. *(in USA)*
7. **Bianco R., Rapp M.A.** Codeposition of Elements in Diffusion Coatings by the Halide-Activated Pack Cementation Method. *Journal of Metals*, Nov. 1991, p. 68-73 *(in USA)*
8. **Rudenkij S.G.** Vakuumno-aktivirovannoe hromirovanie stali 20 v nanokristallicheskom poroshke. Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. 2012, t. 10, №1, s. 29-35 *(in Russian)*
9. **Guseinov A.G.** Vosstanovlenie i uprochnenie precizionnyh detalej mashin i apparatury kompleksnoj diffuzionnoj metallizaciej. *Vestnik mashinostroeniya*, 2000, № 05 *(in Russian)*
10. **Guseinov A.G.** Mekhanicheskaya obrabotka precizionnyh detalej s diffuzionnymi pokrytiyami. *Vestnik mashinostroeniya*, 2002, № 11 *(in Russian)*
11. **Hüseynov Ə.G., Kazımova X.A., Əsədov Ş.A.** Diffuzion metallaşdırma üsulu ilə bərpa olunmuş presizion hissələrin çatdırma prosesinin nəzəri əsasları. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri.* C.10. №3, 2018, c. 51-62 *(in Azerbaijani)*

# Energy Assessment of the State of Pipe Column in the Deep Well Drilling

**D.A. Volchenko[1], H.F. Miralamov[2], V.T. Bolonniy[3], M.V. Savchin[3], V.Ya. Malyk[3], Ya.M. Savchin[3]**

*[1] Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Karpatska st., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)*
*[2] Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*
*[3] Drohobich College of Oil and Gas (Qrushevski str. 57, Drohobich, 82100, Ukraine)*

**For correspondence:**
Skrıpnık Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Abstract**

The paper studies the technological features of drilling and the compressed air expulsion, and a generalized assessment of the heat balance of pipe column in drilling well. An algorithm of the non-equilibrium thermodynamics with the linear regimes of energy loading of the pipe column during a well drilling is considered. A computational analysis is performed with the following initial data: D=0.28 m; d=0.155 m; $t_p$=48°C; $t_1$=23.6°C; $t_2$=35.3°C; thermal conductivity coefficients: rocks $\lambda_1$=2.56 W/(m·°C); and steel pipe of the column $\lambda_2$ and $\lambda_3$ = 60 W/(m ·°C); the heat transfer coefficient from the ascending and outgoing flows of the washing liquid are 175 W/(m·°C) and 256 W/(m·°C). In this case, the average linear heat transfer coefficient is 220 W/($m_2$·°C). An algorithm for estimating the heat balance of the drill column and its annulus during their interaction with humidified compressed air is proposed. When the well is purged with compressed air, the average linear heat transfer coefficient is 95 W/($m_2$·°C); the bulk temperature gradient for mud at the bottom of a 100 m long drill string was 0.03 °C/m. From the above parameters, the ratios are formed that are equal to the Onsager and Saxen ratios, which makes it possible to determine the parameters by calculation.

**Keywords:** borehole, drill column, drilling fluid, compressed air, inter-tubular volume.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_64_73

***Received*** *07.04.2021*
***Revised*** *19.09.2022*
***Accepted*** *22.09.2022*

**For citation:**
*Volchenko D.A., Miralamov H.F., Balonniy V.T., Savchin M.V., Malyk V.Ya., Savchin Ya.M.*
[Energy assessment of the state of pipe column in the deep well drilling]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 64-73 *(in English)*

# Dərin qazıma quyusunda borunun vəziyyətinin enerji qiymətləndirilməsi

**D.A. Volçenko[1], H.F. Mirələmov[2], V.T. Bolonnıy[3], M.V. Savçin[3], V.Y. Malık[3], Y.M. Savçin[3]**

[1]*İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç.15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)*
[2]*Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*
[3] *Droqobıç Ixtisaslaşdırılmış Neft və Qaz Kolleci (Qruşevskiy küç. 57, Droqobıç, 82100, Ukrayna )*

**Yazışma üçün:** Skrıpnık Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Xülasə**

Məqalədə, quyunun sıxılmış hava ilə qazılması və üfürülməsinin texnoloji xüsusiyyətləri və qazıma quyusunda boru kəmərinin istilik balansının ümumiləşdirilmiş qiymətləndirilməsi məsələləri nəzərdən keçirilib. Quyuların qazılması zamanı boru kəmərinin enerji yüklənməsinin xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikasının alqoritmi işlənilib. Verilmiş ilkin məlumatlarla hesablama təhlili aparılıb: $D$=0,28 m; $d$=0,155 m; $t_p$=48°S; $t_1$=23,6°S; $t_2$=35,3°S; istilikkeçiricilik əmsalları: qayalar $\lambda_1$=2,56Vt/(m·°S); və polad boru kəməri $\lambda_2$ və $\lambda_3$ = 60 Vt/(m·°S); yuyucu mayenin yüksələn və çıxan axınlarından istilikötürmə əmsalı: 175 Vt/(m·°S) və 256 Vt/(m·°S) təşkil edib. Bu halda, orta xətti istilikötürmə əmsalı 220 Vt/(m$^2$·°S)-dir. Nəmlənmiş sıxılmış hava ilə qarşılıqlı əlaqə zamanı borunun istilik balansının və borulararası həcmin qiymətləndirilməsi alqoritmi təklif edilib. Onsager və Saksen nisbətləri parametrlərin hesablama yolu ilə müəyyənləşdirilməsinə imkan verir.

**Açar sözlər:** qazıma quyusu, qazıma borusu, gilli məhlul, sıxılmış hava, borulararası həcm.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_64_73

**УДК:** 622.241.8

# Энергетическая оценка состояния колонны труб в бурящейся глубокой скважине

**Д.А. Вольченко[1], Г.Ф. Мираламов[2], В.Т. Болонный[3], М.В. Савчин[3], В.Я. Малык[3], Я.М. Савчин[3]**

[1] *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)*
[2] *Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*
[3] *Дрогобычский специализированный колледж нефти и газа (ул. Грушевского, 57, г. Дрогобыч, 82100, Украина)*

**Для переписки:**
Скрыпнык Василий / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

**Аннотация**

В работе рассмотрены технологические особенности бурения и продувки сжатым воздухом скважины и обобщенная оценка теплового баланса колонны труб в бурящейся скважине. Рассмотрен алгоритм неравновесной термодинамики с линейными режимами энергонагруженности колонны труб при бурении скважины. Выполнен расчетный анализ при следующих исходных данных: D = 0,28 м; d = 0,155 м; tп = 48°С; t1 = 23,6°С; t2 = 35,3°С; коэффициенты теплопроводности: горных пород λ1=2,56 Вт/(м·°С); и стальной трубы колонны λ2 и λ3 = 60 Вт/(м·°С); коэффициент теплоотдачи от восходящего и исходящего потоков промывочной жидкости составили 175 Вт/(м·°С) и 256 Вт/(м·°С). При этом средний линейный коэффициент теплоотдачи составляет 220 Вт/(м2·°С). Предложен алгоритм оценки теплового баланса бурильной колонны и ее межтрубного объема при их взаимодействии с увлажненным сжатым воздухом. Соотношения Онзагера и Саксена позволяют определить параметры расчетным путем.

**Ключевые слова:** буровая скважина; колонна бурильных труб; глинистый раствор; сжатый воздух; межтрубный объем.

**Introduction**

The existing methods for designing drill strings do not fully take into account the specific conditions of their operation when drilling deep wells, in particular, the weakening of the material of drill pipes and the decrease in their performance characteristics with an eccentric location of the drill string in the well and elevated volumetric operating temperatures, and a number of other factors also affect factors. In most geological regions of near and far abroad, the volume temperature of mountain rocks at a depth of 5-10 km reaches 200-400°C, which requires the creation of heat-resistant drilling fluids, supported by a forecast of the energy assessment of the state of the pipe string in a deep well being drilled.

**Analysis of literary sources and the state of the problem**

A well-known classical scheme for determining the heat transfer coefficient through a cylindrical wall [1]. This coefficient characterizes the intensity of heat transfer from one liquid to another through the wall separating them.

The work [2] outlines the scientific foundations and practical methods for calculating the temperature inside a drilling well for various technological processes and stages of drilling, highlights the role of the temperature factor in the occurrence of complications during drilling, summarizes and analyzes the results of domestic and foreign experimental and theoretical studies on the study of the temperature regime of drilling wells. wells, the methodology and results of studying the temperature fields of the near-wellbore and bottom-hole zones and the working part of the drilling tool and pipes in turbine and rotary drilling are given. However, this material did not propose a multilayer structure in relation to the drill string to determine the heat transfer coefficient through its wall.

In [3], it is noted that the temperature field of the well is formed under the influence of the heat exchange process between the circulating flushing fluid and the rocks that make up the well. The temperature of the rock mass can be tentatively estimated using a geometric gradient that determines the temperature increments per 1 m of the well depth:

$$T_3 = t_0 + n°L, \quad (1)$$

where $T_3$ is the temperature of rocks; $t_0$ is the temperature of the neutral layer; $n°$- geometric gradient; $L$ - the current well depth.

The neutral layer is understood as the layer of constant annual temperature. The depth of its occurrence is determined by the temperature conditions on the earth's surface, the thermophysical properties of rocks, and the rheological and geomorphological features of the given region. For most areas, the depth of the neutral layer is 20-40 m, and its temperature is considered to be usually equal to the average annual air or soil temperature (in the range from 0 to 15°C). It is obvious that the neutral temperature layer is heat-insulating, which does not allow heat flow to penetrate deep into the well.

To determine the heat transfer coefficients from the outer and inner surface of the drill pipe, which are constituent dependencies for determining the heat transfer coefficient. The complex apparatus of the theory of similarity is applied. In the latter, from the base pipe with certain geometric parameters, from which they switch to other

pipe sizes, which leads to inaccuracies in the calculated results [1].

Let us dwell briefly on the basic principles that take place in thermal problems. Reciprocity is used in solving some problems of heat conduction; this means that if the heat source Is located at point 1 causes a temperature change $\Delta t = f(\tau)$ at point 2, then if the source is moved to point 2, the same temperature change will occur at point 1 [4].

It should be emphasized that at mutual points the rates of temperature change are the same, but the temperature gradients are different, so it must be remembered that the transition to an equivalent problem - the temperature fields turn out to be different. The importance of applying the reciprocity principle in problems of heat conduction is known [4].

These include under the action of a heat source: in a semi-limited body or in an unlimited plate; a plate covered with a layer of turbulent fluid, as well as in a plate in the presence of a fluid layer and an adiabatic level on one boundary, and a type III boundary condition on the other. Symmetry - proportionality, proportionality of the parts of the product located on both sides of the middle of the center.

The problem is to generalize the energy assessment of the state of a pipe string in a deep well being drilled by applying non-equilibrium thermodynamics with linear thermal loading.

In this publication, the following issues are considered: technological features of drilling and blowing a well with compressed air; a generalized assessment of the heat balance of the pipe string in the drilling well; the discussion of the results.

**The purpose of the work** is to substantiate the possibility of using non-equilibrium thermodynamics with linear thermal regimes as applied to a pipe string in a drilling well.

**Technological features of drilling and blowing compressed air wells**

Let us consider the technological features of drilling when a clay solution is used as a medium.

Drilling period. When the fluid moves in the drill string, the work of the flow is in the field of gravitational forces, the polytropic expansion of the liquid passes without the return of external work and with the release of heat through the walls of the drill string. In the bottomhole volume, an adiabatic outflow from the bit channels occurs with friction and heating due to heat generation that occurs when the drilling tool crown rubs against the rock being destroyed when the mud moves in the annulus. In this case, schemes of direct and reverse flushing with a solution of a drilling well are used (Fig. 1 a, b).

The heat exchange processes of the drill pipe string depend on its location in relation to the borehole walls (Fig. 1 c, d). With one amount of fluid flow rate, with a symmetrical arrangement of the drill string, we have a quasi-stable temperature field, and with an eccentric arrangement, it is non-stationary.

From the point of view of the thermal regime, the period of blowing the well before drilling differs from the period of drilling the well by the absence of heat release on the contact surface between the bit and the array, since the destruction of the array does not occur during this period. The air jet at the bottom of the well is heated as a result of heat exchange with the rock mass.

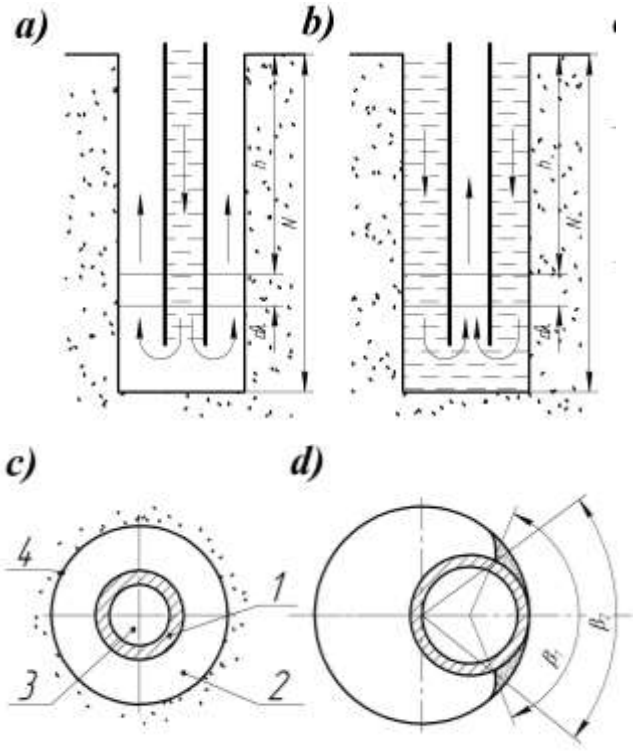



**Figure 1 a, b, c, d –** Schemes of direct (a) and reverse (b) flushing with a solution of a drilling well and its cross sections with a symmetrical (c) and eccentric (d) arrangement of the drill string: 1 – drill string; 2 - annulus volume; 3 - solution with rock being carried out; 4 – rock

On fig. 2 shows the algorithm for estimating the heat balance of the drill string and its annulus during their interaction with humidified compressed air.

During the downtime of the well due to tripping operations, the non-stationary temperature field in the rock mass around the well is restored and the air filling the well is heated, which is accompanied by free convective heat transfer inside the well and moistening the air as a result of evaporation of moisture from the uncased part of the well walls.

In this case, a scheme of direct and reverse blowing of the well with compressed air is implemented (Fig. 3 a, b) to remove the clay solution with the products of destruction of rocks.

Generalized energy estimation of the heat balance of a pipe string in a drilling well

The importance of applying the reciprocity principle in problems of heat conduction is known [4]. These include under the action of a heat source: in a semi-limited body or in an unlimited cylindrical tube; a pipe covered with a layer of turbulent fluid, as well as in a pipe in the presence of a fluid layer and an adiabatic condition on one boundary, and a type III boundary condition on the other.

Symmetry - proportionality, proportionnality of the parts of the product located on both sides of the middle of the center. On fig. 4 shows the algorithm of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes of energy loading of the pipe string during well drilling.

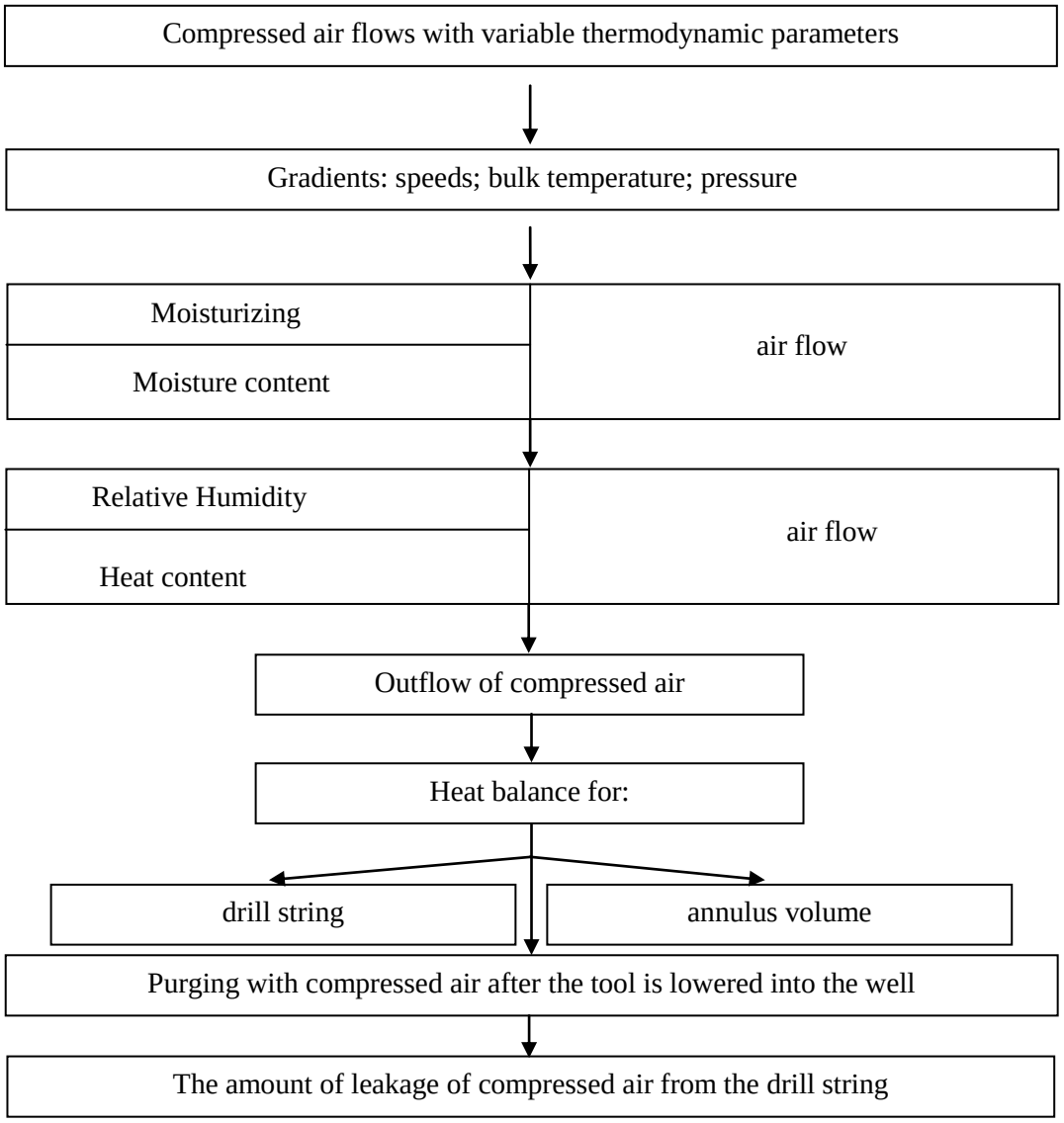



**Figure 2 –** Algorithm for estimating the heat balance of the drill string and its annular volume during their interaction with humidification by compressed air

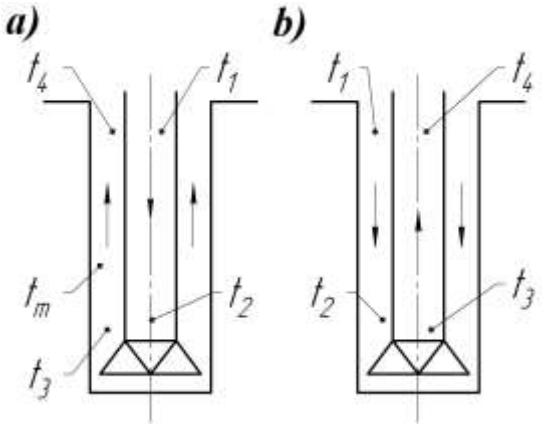



**Figure 3 a, b –** Schemes of direct (a) and reverse (b) blowing of the well with compressed air, taking into account its leakage: tm is the temperature of the air mixture in the annulus, resulting from the displacement of air coming from the bottom of the well in the amount of $G_2$, with air entering into annular volume directly from the drill string due to leakage through threaded connections in the amount of $G_1$ - $G_2$; $t_{1\ -4}$ - air temperature, respectively, at the inlet to the drill string, in front of the drilling tool, at the exit from the bottomhole and at the exit from the well; $d_4$ - moisture-containing jets at the exit of their well; $t_{p.sr}$ - average temperature of rocks along the depth of the well

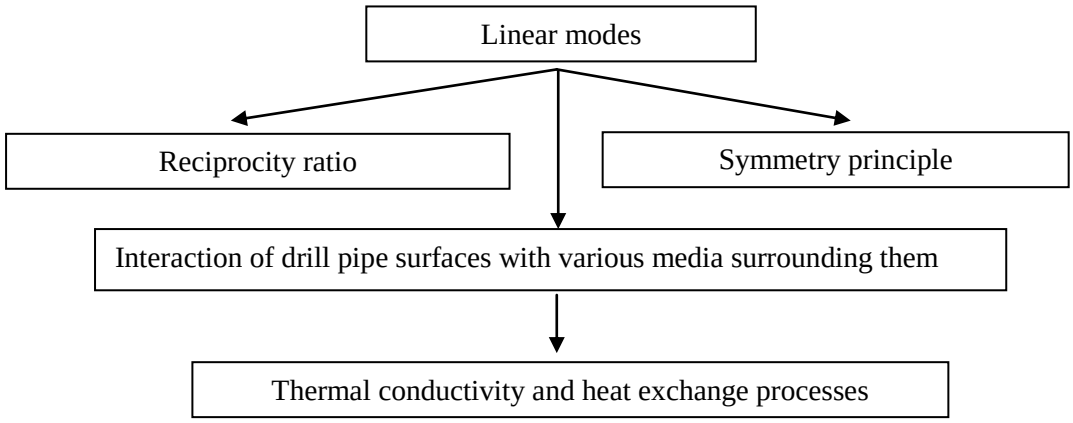



**Figure 4 –** Algorithm of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes of energy loading of the pipe string during well drilling

**Table 1 –** Linear heat transfer coefficients in a multilayer structure of a drilling well

| Heat exchange processes: | Estimated dependencies |
|---|---|
| «rock - annulus with mud»: | $K_1 = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\lambda}{\alpha_1 d_1}}$; (1) |
| «annulus with mud – the outer surface of the column wall»: | $K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1 d_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$; (2) |
| «the inner surface of the column wall - clay solution with rock»: | $K_3 = \frac{1}{\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_2 d_2}}$; (3) |
| Total heat transfer coefficient | $K = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2 d_2}}$. (4) |

Symbols: $\delta_i$, $\lambda_i$, $\alpha_i$ – thicknesses, thermal conductivity and heat transfer coefficients of the corresponding layers of the multihierarchical structure of the drilling well.

Let us dwell on the determination of the linear heat transfer coefficients in the multi-layer structure of a drilling well (Table 1).

Dependence (1) is not completely included in expression (4), since it almost does not affect the numerical value of K [5].

The components included in dependence (4) are the thermal resistances of thermal conductivity ($\delta_i$ / $\lambda_i$) and heat transfer (1/ $\lambda_i d_i$).

The value of $K_i$ is called the linear heat transfer coefficient; it characterizes the intensity of heat transfer from the fluid solution in the annulus to another fluid with rock through the drill string wall separating them.

The reciprocal of the linear heat transfer coefficient is called the linear thermal resistance to heat transfer:

$R_i = 1/k_l = 1/\alpha_1 d_1 + (1/2\lambda)\ln d_2/d_1 + 1/\alpha_2 d_2 = R_{ж1} + R_c + R_{ж2}$; (5)

$R_l$ = measured in (m·K)/W.

The computational analysis [6] was performed with the following initial data: $D$ = 0.28 m; $d$ = 0.155 m; $t_p$ = 48°C; $t_1$ = 23.6°C; $t_2$ = 35,3°C; thermal conductivity coefficients: rocks $\lambda_1$=2.56 W/(m ·°C); and steel pipe of the column $\lambda_2$ and $\lambda_3$ = 60 W/(m · °C); the heat transfer coefficient from the ascending and outgoing flows of the washing liquid was 175 W/(m·°C) and 256 W/(m·°C). In this case, the average linear heat transfer coefficient is 220 W/(m$^2$ ·°C).

In metal cylindrical pipes, the heat flux may differ in direction from the temperature gradient; a temperature gradient in one direction can cause heat flow in the other direction. Entropy production is determined by the expression [7]:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{k} J_{qi} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{T}\right), \quad (6)$$

where $J_{qi}$–heat flow; $x_i$ – cartesian coordinates; $T$ – ambient volumetric temperature.

The heat flux for a discrete system of tribocoupling is determined from the expression

$$J_{qi} = \sum_k L_{ik} \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{1}{T}\right) = \sum_k \left(\frac{-L_{ik}}{T^2}\right)\frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (7)$$

where $L_{ik}$ – Onsager's reciprocity.

For anisotropic solids, the thermal conductivity is a second rank tensor.

Fourier's law in this case is written as

$$J_{qi} = -\sum_k k_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (8)$$

Based on comparison (7) with (8), we obtain the equality

$$L_{ik} = T^2 k_{ik}. \quad (9)$$

The reciprocity relation $k_{ik} = k_{ki}$ then means that

$$k_{ik} = k_{ki}, \quad (10)$$

i.e., thermal conductivity is a symmetrical tensor. For many metal cylindrical pipes, their symmetry and their crystal structure imply that $k_{ik} = k_{ki}$.

However, this does not at all mean confirmation of the reciprocity relations, since it follows from the trigonal, tetragonal, and hexagonal symmetry of crystals that [8]

$$k_{12} = -k_{21}. \quad (11)$$

If the reciprocity relations are valid, then

$$k_{12} = k_{21} = 0. \quad (12)$$

Equation (12) implies that a temperature gradient in the x direction causes a heat flow in the positive y direction, but a gradient in the y direction causes a heat flow in the negative x direction. It follows from Onsager's reciprocity relation that the validity of the reciprocity relation is confirmed [10-12].

In table 2 and 3 show the quantitative ratios of velocity gradients, volumetric temperature and pressure during forward and reverse flushing of a drilled well with mud, as well as purging the annulus with compressed air after the tool is lowered into the well. The minimum ratio in both cases was observed for the pressure gradient, and the maximum for the velocity gradient.

**The discussion of the results**

Studies of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes of parameter changes during the interaction of the surfaces of a drilling string of pipes based on the reciprocity relation and symmetry principles made it possible to establish the following [9]:

**Table 2 –** Parameters and their ratios during forward and reverse flushing of a drilling well

| Gradients and ratios | | Estimated dependencies |
|---|---|---|
| Onsager relations | Flow potential | $\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p}\right)_{I=0} = -\frac{L_{12}}{L_{11}} = 0{,}95;$ (13) |
| | Gradients: | |
| | speed | $\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \frac{L_{12}}{L_{11}} = 0{,}97;$ (14) |
| | bulk temperature | $\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = -\frac{L_{12}}{L_{22}} = 0{,}9;$ (15) |
| | pressure | $\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \frac{L_{12}}{L_{22}} = 0{,}89;$ (16) |
| Saxene ratios | | $\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p}\right)_{I=0} = -\left(\frac{J_1}{J_2}\right)_{\Delta p=0} = 0{,}9;$ (17)<br>$\left(\frac{\Delta p}{\Delta\phi}\right)_{J=0} = -\left(\frac{J_2}{J_1}\right)_{\Delta\phi=0} = 0{,}98.$ (18) |

**Table 3 -** Parameters and their ratios when blowing with compressed air after the tool is lowered

| Parameters and ratios | | Estimated dependencies |
|---|---|---|
| Onsager relations | Flow potential | $\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p}\right)_{I=0} = -\frac{L_{12}}{L_{11}} = 0{,}9;$ (19) |
| | Gradients: | |
| | speed | $\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \frac{L_{12}}{L_{11}} = 0{,}95;$ (20) |
| | bulk temperature | $\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = -\frac{L_{12}}{L_{22}} = 0{,}92;$ (21) |
| | pressure | $\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \frac{L_{12}}{L_{22}} = 0{,}9;$ (22) |
| Saxene ratios | | $\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p}\right)_{I=0} = -\left(\frac{J_1}{J_2}\right)_{\Delta p=0} = 0{,}9;$ (23)<br>$\left(\frac{\Delta p}{\Delta\phi}\right)_{J=0} = -\left(\frac{J_2}{J_1}\right)_{\Delta\phi=0} = 0{,}92.$ (24) |

An algorithm for estimating the heat balance of the drill string and its annulus during their interaction with humidified compressed air is proposed. An algorithm of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes of energy loading of a pipe string during well drilling is considered. Carried out computational analysis with the following

initial data: $D$ = 0.28 m; $d$ = 0.155 m; $t_p$=48°C; $t_1$ = 23.6°C; $t_2$ = 35.3°C; thermal conductivity coefficients: rocks $\lambda_1$=2.56 W/(m·°C); and steel pipe of the column $\lambda_2$ and $\lambda_3$=60 W/(m·°C); the heat transfer coefficient from the ascending and outgoing flows of the washing liquid was 175 W/(m·°C) and 256 W/(m·°C). In this case, the average linear heat transfer coefficient is 220 W/(m$^2$·°C); when the well is purged with compressed air, the average linear heat transfer coefficient is 95 W/(m$^2$·°C); the bulk temperature gradient for mud at the bottom of a 100 m long drill string was 0,03 °C/m. From the above parameters, ratios are formed that are equal to the Onsager and Saxen ratios, which makes it possible to determine the parameters by calculation.

## REFERENCES

1. **Kushnyrov V.I., Lebedev V.I., Pavlenko V.A.** Technical thermodynamics and heat transfer. M.: *Stroyizdat*. 1986. - 464 p. *(in English)*
2. **Shcherban A.N., Chernyak V.P.** Forecast and regulation of the thermal regime when drilling deep wells. M.: *Nedra,* 1974. - 248 p. *(in English)*
3. **Fine G.M.**, **Neimark A.S.** Design and operation of drill strings for deep wells. M.: *Nedra*, 1985. – 237 p. *(in English)*
4. **Glensdorf P., Prigozhin I.** Thermodynamic theory of the structure of stability and fluctuations. M.: *Mir*, 1973. - 295 p. *(in English)*
5. **Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M.** Calculations of the thermal regime of solids. L.: *Energia,* 1976. 352 p. *(in English)*
6. Pipes of oil assortment. Directory. M.: *Nedra*, 1987. - 488 p. *(in English)*
7. **Kozdoba L.A.** Electrical modeling of the phenomena of heat and mass transfer. M.: *Energia,* 1972. - 296 p. *(in English)*
8. **Bagramov R.A.** Drilling machines and complexes. Textbook for universities. M.: *Nedra,* 1988. – 501 p. *(in English)*
9. **Prigogine I., Kondepudi D.** Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures: Per. from English Yu.A. Danilov and V.V. Bely. M.: *Mir*, 2002. 461 p. *(in English)*
10. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Volchenko D.A. [and others].** Electrothermomechanical frictional interaction in friction pairs during the cracking process (part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, Baku, No. 3, 2020, pp. 12-31 *(in English)*
11. **Zhuravlev D.Yu.** Thermodynamic limit of surface layers of polymer linings in frictional interaction. Kharkov: *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2014, No. 2 / 11 (68). Pp. 20-26 *(in English)*
12. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Skripnik V.S. [and others].** Electrothermomechanical frictional interaction in friction pairs during the cracking process (part II), *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, Baku, Vol.12, No. 4, 2020, pp. 19-26 *(in English)*

# Efficient Gathering and Transport of Associated Multiphase Gases in Accordance with the Dynamics of Gas Resources

## F.B. Ismayilova

*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**

The article analizes the issues of gathering and transport of condensing associated gases, taking into account the flow rate and pressure of gas pumping. It is shown that the issues of efficient use (utilization) of associated gases are mainly related to the problem of their transport in a multiphase state. In the article it is also shown ways to improve the efficiency of gathering and transport of associated gases.

**Keywords:** multiphase, associated gases, condensing gases, gas flow rate, transport distance, pumping pressure.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_74_79

***Accepted*** *11.01.2022*
***Received*** *17.09.2022*
***Revised*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Ismayilova F.B.*
[Efficient gathering and transport of associated multiphase gases in accordance with the dynamics of gas resources]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 74-79 *(in Azerbaijani)*

# Qaz resurslarının dinamikasına uyğun multifazalı səmt qazlarının səmərəli yığılması və nəqli

## F.B. İsmayılova

*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 qaz resurslarının dinamikası (qazın sərfi və başlanğıc nəql təzyiqi nəzərə alınmaqla), tez kondensləşə bilən səmt qazlarının yığılması və nəqli məsələləri araşdırılmışdır. Səmt qazlarının səmərəli istifadəsi (utilizasiyası) məsələsinin əsasən onların multifazalı şəkildə nəqlinin problemi ilə bağlılığı göstərilmişdir. Məqalədə, həmçinin bu cür qazların yığılması və nəqlinin səmərəliliyinin artırılmasının yolları göstərilmişdir.

**Açar sözlər:** multifaza, səmt qazları, kondensləşən qazlar, qazın sərfi, nəql məsafəsi, nəql təzyiqi.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_74_79

**УДК:** 542.73

# Эффективный сбор и транспорт попутных мультифазных газов в соответствии с динамикой газовых ресурсов

## Исмаилова Ф.Б.

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

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

**Аннотация**

В статье проанализированы вопросы сбора и транспорта конденсирующих попутных газов с учетом расхода и давления перекачки газа. Показано, что вопросы эффективного использования (утилизация) попутных газов связаны в основном с проблемой их транспорта в мультифазном состоянии. В статье также показаны пути повышения эффективности сбора и транспорта попутных газов.

**Ключевые слова:** мультифаза, попутные газы, конденсирующие газы, расход газа, дальность транспорта, давление перекачки.

**Giriş**

Səmt neft qazlarının istifadəsi zamanı yaranan mühüm problemlərdən biri qaz resurslarının dinamikası ilə bağlıdır. Yataqların işlənilməsinin qəbul edilən dinamikasına uyğun olaraq çıxarılan maksimal qaz həcmi işlənmənin əvvəlki illərinə uyğun gəlir və sonra qaz hasilatı tədricən azalmağa başlayır və bir neçə on ildən sonra sıfra qədər düşür. Odur ki, yataqların abadlaşdırılması, neftin və qazın yığılması və nəqli sistemlərinin layihələndirilməsi zamanı texnoloji neft və qaz kəmərlərinin diametrinin düzgün seçilməsinin əhəmiyyəti çox böyükdür [1-5]. Mədən texnoloji qaz kəmərlərinin düzgün layihələndirilməsi, səmt neft qazlarının yığılması və nəqlinin səmərəliliyinin artırılması onların multifazalı olmasından çox asılıdır.

Təbii qazın, qaz-kondensatın və neftin çıxarılması və nəqli obyektlərinin səmərəli istismarı sistemin əsas parametrlərinin, keyfiyyət və kəmiyyət xarakteristikalarının hesablanması və onda baş verən fiziki proseslərin təhlilini tələb edir.

Qaz-maye qarışıqlarının hərəkətinə çoxlu sayda nəzəri və təcrübi tədqiqatların həsr olunmasına baxmayaraq, multifazalılıqla bağlı bir çox məsələlər hələlik öz həllini gözləməkdədir.

Neftqaz işində multifazalı axınlara demək olar ki, hər zaman, hər yerdə: məhsuldar laydan başlayaraq quyu məhsulunun hazırlanması qurğusunadək rast gəlinir. Bu cür axınlar öz tərkibinə görə müxtəlif olmaqla, neft, su, qaz və mexaniki hissəciklərin müxtəlif qarışıqlarından ibarət olur.

Multifazalı sistemlərin nəqlinin əsasında fazaların qarşılıqlı təsiri durur. Bu təsirin hərəkət verici qüvvəsi isə Bernulli qüvvəsi hesab edilir [6]:

$$F = 0.167\pi d^3 \rho v \, dv/dr \qquad (1)$$

Burada d – dispersfazanın hissəciyinin diametri; ρ-dispersion mühitin sıxlığı; $v$-dispersion mühitin hərəktinin mütləq (ani) sürəti; $dv/dr$- en kəsik boyu statik təzyiq qradiyentidir.

Təhlillər göstərir ki, multifazalı sistemlərin nəqli bir sıra qeyri-məhsuldar enerji xərcləri ilə bağlı olur. Bu xərclər ən çox fazaların ayrı-ayrı, təbəqələşmiş hərəkəti zamanı daha çox olur və qalxan hissədə sistemdə təzyiq döyüntüləri baş verir. Bu cür hərəkət rejimləri bir qayda olaraq boru kəmərində maye fazanın toplanması ilə xarakterizə olunur. Bu hal o vaxta kimi davam edir ki, Bernulli qüvvəsi ilə qravitasiya qüvvəsinin müvazinəti yaransın [6]. Qeyd olunanları nəzərə alaraq, multifazalı səmt qazlarının tez kondensləşən qaz olmasını onların nəqli və boru kəmərlərinin hidravlik hesablanması üçün əsas götürmək vacibdir.

Ümumiyyətlə, səmt neft qazlarının (SNQ) nəqlini həyata keçirən qaz kəmərlərinin hidravlik hesablanmasını aşağıdakı iki metodikaya uyğun olaraq aparmaq olar:

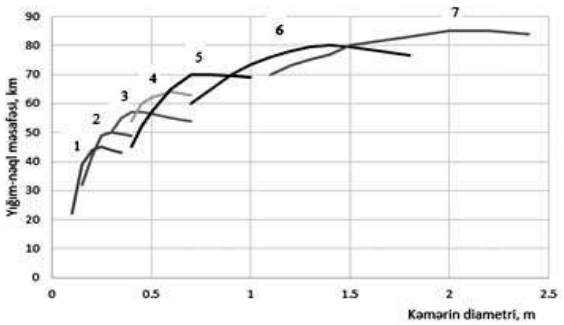
1. Monofazalı qazın nəqli üçün olan metodika
2. Multifazalı axın üçün olan metodika.

Kondensləşən qazın monofazalı metodikasına uyğun aparılan hesablamalara görə qaz kəmərinin diametrini böyütməklə neftin separasiya təzyiqi altında nəql məsafəsini istənilən qədər artırmq mümkündür. Buna baxmayaraq, təcrübədən yaxşı məlumdur ki, kondensləşən səmt qazlarının boru kəmərləri ilə separasiya təzyiqi (0.6-0.8MPa) altında 30-50 km-dən uzağa nəql etmək mümkün olmur. Qeyd olunan məsafədən çox olduqda qaz kəməri kondensatla dolmağa başlayır və nəticədə qazın nəqli, demək olar ki, mümkünsüz olur.

Məsələn, aparılan tədqiqat işlərində göstərilmişdir ki, monofaza vəziyyətində qazın nəql məsafəsinin kəmərin diametrinin çoxalması ilə artması mümkün olduğu halda, qazın multifazalı (qaz+kondensat) nəqlinin məsafəsi maksimal qiymətə malik olmaqla məhduddur [7-9]. Dəniz yataqlarından kondesləşən səmt qazların yığılması və nəqlinin yatağın işlənmə dinamikasından xeyli asılı olduğunu nəzərə alaraq, 0.6; 1; 1.5; 2.5; və 4.0 MPa təzyiq altında və qazın sərfinin 0.024; 0.048; 0.12; 0.24; 0.48; 1.2 və 2.4 mln. $m^3$/gün qiymətlə-

rində multifazalı axınlar üçün nəql məsafəsinin (L) qaz kəmərinin diametrindən asılıqlarını təyin etmək üçün hidravlik hesablamalar aparılmışdır.

Hidravlik hesablamalar multifazalı axınlarda fazaların qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla təkmilləşdirilmiş metodikaya uyğun olaraq [7-9] aparılmış, müxtəlif təzyiq və qaz sərfləri üçün L=f(D) asılılıqları qurulmuşdur. Qurulmuş bu asılıqlara əsasən müəyyən edilmişdir ki, baxılan bütün hallarda kondensləşən qazların nəql məsafəsi məhduddur və maksimal nəql məsafəsi ilə xarakterizə olunur. Məsələn, $P_b$=1 MPa və $P_s$=0.25 MPa təzyiqlərdə qazın maksimal nəql məsafəsinin qazın sərfindən və kəmərin diametrindən asılı olaraq dəyişməsi cədvəl 1 və şəkil 1-də göstərilmişdir.




1÷7 – uyğun olaraq $Q_q$=0.024; 0.048; 0.12; 0.24; 0.48; 1.2 və 2.4 mln. $m^3$/gün olduqda

**Şəkil 1** - Multifazalı kondensləşən qazın yığım-nəql məsafəsinin diametr və qazın sərfindən asılılığı ($P_b$=1 MPa və $P_s$=0.25 MPa)
**Figure 1** - The dependence of the gathering and transport distance of multiphase condensing gas on the diameter and gas flow rate ($P_i$=1 MPa and $P_e$=0.25MPa)

**Cədvəl 1** – Multifazalı qazın $P_b$=1 MPa və $P_s$=0.25 MPa təzyiqlərdə yığım-nəql məsafəsinin müxtəlif diametr və sərfin qiymətləri üçün dəyişməsi
**Table 1** – Change of gathering and transportation distance of multiphase gas at pressures $P_i$ = 1 MPa and $P_e$ = 0.25 MPa for different diameters and flow rates

| Şərti diametr, D, m | $Q_q$, mln $m^3$/gün | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.024 | 0.048 | 0.12 | 0.24 | 0.48 | 1.2 | 2.4 |
| 0.1 | 22 | | | | | | |
| 0.15 | 39 | 32 | | | | | |
| 0.20 | 44 | 42 | | | | | |
| 0.25 | 45 | 42 | | | | | |
| 0.30 | 44 | 50 | 50 | | | | |
| 0.35 | 43 | 49.5 | 55 | | | | |
| 0.40 | | 49 | 57 | 54 | 45 | | |
| 0.45 | | | 57 | 60 | 52 | | |
| 0.50 | | | 56.5 | 62 | 57 | | |
| 0.60 | | | 55 | 64 | 65 | | |
| 0.70 | | | 54 | 63 | 70 | 60 | |
| 0.80 | | | | | 70 | 65 | |
| 0.90 | | | | | 69.5 | 70 | |
| 1.0 | | | | | 69 | 73.5 | |
| 1.1 | | | | | | 75.5 | 70 |
| 1.2 | | | | | | 78 | 74 |
| 1.3 | | | | | | 79 | 77 |
| 1.4 | | | | | | 80 | 78 |
| 1.5 | | | | | | 79.5 | 79 |
| 1.8 | | | | | | 76.5 | 82 |
| 2.0 | | | | | | | 85 |
| 2.2 | | | | | | | 85 |
| 2.4 | | | | | | | 84 |

Cədvəl 1 və şəkil 1-dən göründüyü kimi, başlanğıc nəql təzyiqində ($P_b$=1 MPa ) qazın maksimal yığım-nəql məsafəsi qazın sərfindən asılı olaraq $Q_q$=0.024 mln $m^3$/gün olduqda 45 km-dən 85 km-dək ($Q_q$=2.4 mln $m^3$/gün olarsa) dəyişir.

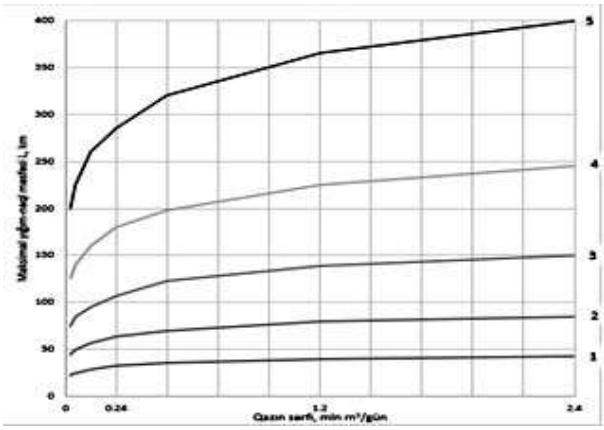
Başlanğıc nəql təzyiqindən və qazın sərfindən asılı olaraq maksimal nəql məsafəsinin hesablanmış qiymətləri cədvəl 2-də verilmişdir.

Göründüyü kimi, 0.6, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 MPa təzyiq altında kondensləşən qazların maksimal yığım-nəql məsafəsi qazın sərfindən asılı olaraq artır və uyğun olaraq, 22.5-43; 45-85; 75-150; 126-245 və 200-400 km intervalında dəyişə bilir.

**Cədvəl 2** – Qazın sərfi və başlanğıc nəql təzyiqindən ($P_b$) asılı olaraq kondensləşən qazlar üşün maksimal nəql məsafəsinin qiymətləri (km ilə)
**Table 2 –** Maximum transport distance values for condensing gases depending on gas flow rate and initial transport pressure ($P_i$) (in km)

| Qazın sərfi, mln. $m^3$/gün | Nəql təzyiqi, MPa | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 4.0 |
| 0.024 | 22.5 | 45 | 75 | 126 | 200 |
| 0.048 | 25.0 | 50 | 80 | 140 | 225 |
| 0.12 | 29.0 | 57 | 92 | 160 | 260 |
| 0.24 | 33.0 | 64 | 110 | 180 | 285 |
| 0.48 | 35.6 | 70 | 123 | 198 | 320 |
| 1.2 | 40.0 | 80 | 139 | 225 | 365 |
| 2.4 | 43.0 | 85 | 150 | 245 | 400 |

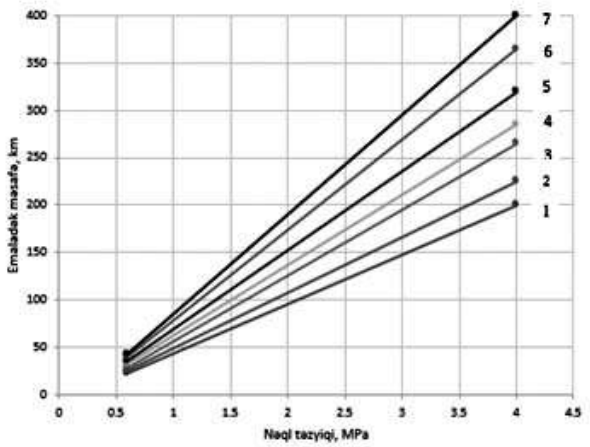
Hidravlik hesablamaların nəticələrinə görə qazın maksimal yığım-nəql məsafəsinin nəql təzyiqi və qazın sərfindən asılılığını əks etdirən qrafiklər şəkil 2-də göstərilmişdir. Göründüyü kimi, bu məsafə nəql təzyiqi və qazın sərfi çoxaldıqca artır.



1÷5 uyğun olaraq $P_b$=0.6; 1; 1.5; 2.5; 4 MPa olduqda

**Şəkil 2** – Multifazalı qazın maksimal yığım-nəql məsafəsinin kəmərin diametrindən asılılığı ($P_s$=0.25MPa)
**Figure 2** – Dependence of the maximum gathering and transport distance of multiphase gas on the diameter of the pipeline ($P_e$ = 0.25MPa)

Neftin mədən hazırlanmasının parametrlərinə görə qaz emalı zavodunun neftçıxarma mədənindən olan məsafəsinin real qiyməti 20-40 km-dən çox olmamalıdır. Onu da qeyd etmək lazımdır ki, qeyd olunan asılılıqlar səmt neft qazlarının yığım-nəql məsafəsinin kondensat çıxarılmadan, multifazalı nəql texnologiyalarını əks etdirən asılılıqlardır. Şəkil 2-dən göründüyü kimi, ən böyük nəql məsafəsi qazın sərfinin $Q_q$=2.4 mln $m^3$/gün qiymətində reallaşır və bu məsafələr 0.6; 1; 1.5; 2.5 və 4.0 MPa başlanğıc nəql təzyiqlərində uyğun olaraq, 43, 85, 150, 245 və 400 km təşkil edir. Qazın sərfi azaldıqda isə yığım-nəql məsafəsi kiçilir. Bu nəticəni qaz emalı zavodunun (QEZ) mədənlərdən olan məsafəsinin maksimal qiymətlərinin nəql təzyiqindən asılılığını əks etdirən qrafiklər çox yaxşı ifadə edir. Qeyd etmək və nəzərə almaq vacibdir ki, göstərilən məlumatlar nəql sistemlərinin məhsuldarlığının maksimal qiymətlərinə uyğun olduğu üçün həmin qiymətlərin artması yol verilməzdir.




1÷7-uyğun olaraq $Q_q$=0.024; 0.048; 0.12; 0.24; 0.48; 1.2 və 2.4 mln. $m^3$/gün olduqda

**Şəkil 3** – Nəql təzyiqi və qazın sərfindən asılı olaraq qaz emalı zavoduna qədər olan məsafənin dəyişməsi
**Figure 3** – Variation of the distance to the gas processing plant depending on the transport pressure and gas flow rate

Mədən qaz kəmərlərinin faktiki yüklənməsinin adətən həmin limit qiymətlərdən kiçik olması isə öz növəsində, qazın yığım nəql məsafəsinin xeyli azalmasına səbəb olur (şək.3).

Göründüyü kimi, yataqların işlənməsi dinamikasına uyğun olaraq, nəql təzyiqi və qazın sərfi nəzərə alınmaqla, QEZ-in neft mədənlərindən maksimal məsafəsini təyin etmək mümkündür.

## Nəticə

Multifazalı səmt qazlarının nəql məsafəsi məhduddur. Tez kondensləşə bilən bu cür qazların yığılması və nəqlinin səmərəliliyi qaz resurslarından və nəql texnologiyasının düzgün seçilməsindən çox asılıdır.

## REFERENCES

1. **Qumbatov Q.Q.** İzuçeniya prosessa sbora, transporta i podqotovki neftey v usloviyax morskix mestorojdeniy Azerbaydjana. Baku, *Elm,* 1996, 240s. *(in Russian)*
2. **Mamayev V.A., Odişariya Q.E., Klapçuk O.V. i dr.** Dvijeniye qazojidkostnıx smesey v trubax. Moskva, *Nedra,* 1978, 270 s. *(in Russian)*
3. **Lutoşkin Q.S., Dunyuşkin İ.N.** Sbornik zadaç po zboru i podqotovki nefti, qaza i vodı na promıslax. Moskva, *Nedra,* 1985, 135 s. *(in Russian)*
4. **Qriçenko A.İ., Klapçuk O.V., Xarçenko Y.A.** Qidrodinamika qazojidkostnıx smesey v skvajinax i truboprovodax. Moskva, Nedra, 1994, 238 s. *(in Russian)*
5. **Suleymanov A.B. i dr.** Ekspluatasiya morskix nefteqazovıx mestorojdeniy. Moskva, *Nedra,* 1986, 284 s. *(in Russian)*
6. **Sitenkov V.T.** Teoriya qradientno-skorostnoqo polya. Moskva, VNİİOENQ, 2004, 308 s. *(in Russian)*
7. **İsmayılov Q.Q., İskəndərov E.X., İsmayılova F.B., Seyfullayev Q.H.** Qaz-kondensat qarışıqları üçün optimal yığım-nəql məsafəsinin təyini. Xəzərneftqazyataq-2016. Məqalələr toplusu, Bakı, 2016, s.253-261 *(in Azerbaijani)*
8. **Alekperov Y.Z., İsmayilova F.B., Xalilov R.Z.** Osobennosti sbora i podqotovki uqlevodorodov v morskix usloviyax dobıçi prirodnıx qazov. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri,* cild 10, 1/2018, s.51-58. *(in Russian)*
9. **İsmayılov Q.Q., Ələkbərov Y.Z., İskəndərov E.X., İsmayılova F.B.** Ekstremal şəraitdə qazların yığılması, hazırlanması və nəqli. Bakı, Elm, 2018, 506 s. *(in Azerbaijani)*

# Theoretical Analysis of the Conversion of Isopropyl Alcohol

**E.A. Guseinova**

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

**For correspondence:**

Guseinova Elvira / elvira_huseynova@mail.ru

**Abstract**

The results of thermodynamic analysis of the conversion of isopropyl alcohol showed that, taking into account the results of the change in the Gibbs energy with temperature, the reaction of the formation of diisopropyl ether during the condensation of alcohol with propylene proceeds without thermodynamic restrictions over the entire temperature range. The process of intermolecular dehydration to diisopropyl ether is thermodynamically more probable at low temperatures (up to 350 K), while in the process of converting isopropyl alcohol into acetone and propylene, the direction of the reaction shifts to the right at temperatures above 350 and 475 K, respectively.

**Keywords:** thermodynamic calculation, Gibbs energy, equilibrium constant, isopropyl alcohol, diisopropyl ether, acetone, propylene.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_80_86

***Accepted*** *10.03.2022*
***Received*** *21.09.2022*
***Revised*** *23.09.2022*

**For citation:**

*Guseinova E.A.*
[Theoretical analysis of the conversion of isopropyl alcohol]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 80-86 *(in Russian)*

# İzopropil spirtinin çevrilməsinin nəzəri təhlili

**E.A. Hüseynova**

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

**Yazışma üçün:**
Hüseynova Elvira / e-mail: elvira_huseynova@mail.ru

**Xülasə**

İzopropil spirtinin çevrilməsinin termodinamiki analizinin nəticələri göstərdi ki, Hibbs enerjisinin qiymətinin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi nəzərə alınmaqla, spirtin propilenlə kondensasiyası zamanı diizopropil efirinin əmələ gəlməsi reaksiyası bütün temperatur diapazonunda termodinamik məhdudiyyətlər olmadan davam edir. Aşağı temperaturlarda (350 K- ə qədər) molekulyararası dehidrasiya prosesi nəticəsində diizopropil efirin əmələ gəlməsi ehtimalı termodinamiki cəhətdən daha böyükdür, izopropil spirtinin aseton və propilenə çevrilməsi prosesində isə müvafiq olaraq, 350 və 475 K-dən yuxarı temperaturlarda reaksiyanın istiqaməti sağa doğru dəyişir.

**Açar sözlər:** termodinamiki hesablama, Hibbs enerjisi, tarazlıq sabiti, izopropil spirti, diizopropil efiri, aseton, propilen.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_80_86

**УДК:** 661.536.543

# Теоретический анализ превращения изопропилового спирта

**Э.А. Гусейнова**

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

**Для переписки:**
Гусейнова Эльвира / e-mail: elvira_huseynova@mail.ru

Результаты термодинамического анализа превращения изопропилового спирта показали, что с учетом результатов изменения энергии Гиббса в зависимости от температуры реакция образования диизопропилового эфира в ходе конденсации спирта с пропиленом во всем интервале температур протекает без термодинамических ограничений. Процесс межмолекулярной дегидратации до диизопропилового эфира термодинамически более вероятен при пониженных температурах (до 350*K*), тогда как в процессе превращения изопропилового спирта в ацетон и пропилен направление реакции смещается вправо при температурах свыше 350 и 475*K* соответственно.

**Ключевые слова:** термодинамический расчет, энергия Гиббса, константа равновесия, изопропиловый спирт, диизопропиловый эфир, ацетон, пропилен.

**Введение**

На всех этапах планирования, проведения и анализа результатов исследования, химических процессов переработки углеводородов и их производных необходимо проведение термодинамического анализа. Свой вклад в область термодинамического анализа химических и нефтехимических процессов внесли такие выдающиеся учёные, как *А.В. Фрост, М.Ф. Нагиев, Ю.М. Жоров, А.В. Киреев, Я.И. Герасимов, А.А. Введенский, И.Б. Рабинович, Г.А. Крестов, И.М. Колесников* и многие другие.

Применение метода термодинамического анализа позволяет подобрать наиболее целесообразную область осуществления конкретной реакции получения, и поэтому работы, позволяющие уточнить имеющиеся или получить новые данные, имеют высокую значимость [1-3].

**Цель работы**

Работа посвящена анализу термодинамических функций реакций превращения изопропилового спирта в ДИПЭ с применением метода Темкина-Шварцмана.

**Постановка задачи**

Термодинамические функции определялись для следующих реакций газо-фазного превращения изопропилового спирта:

*a)* изо-$C_3H_7OH + C_3H_6 \rightarrow C_3H_7OC_3H_7$
*b)* 2 изо-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_7OC_3H_7 + H_2O$
*c)* изо-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_6 + H_2O$
*d)* изо-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_6O + H_2$

Реакции *c* и *d* рассматриваются в качестве сравнительных при определении равновесного состава реакционной смеси.

Расчёт термодинамических параметров проводился методом Темкина-Шварцмана (1947 г.) [4-6], для каждой из 4-х химических реакций в такой последовательности: рассчитывалось изменение энергии Гиббса в интервале 298-625 *K* с шагом 25° по формуле Темкина-Шварцмана; рассчитывались константы равновесия химических реакций $K_;$ рассчитывался равновесный состав реакционной смеси по закону действующих масс.

**Решение задачи**

Абсолютное значение энтальпии образования диизопропилового эфира (ДИПЭ) имеет наибольшее значение, что указывает на наибольшую сложность соединения (табл.1).

Отрицательные значения энтальпий образования ДИПЭ и ацетона, в случае образования этих соединений из простых веществ, свидетельствует об экзотермичности этих реакций, наибольшей для ДИПЭ. Как видно, изменение энтальпии реакции образования диизопропилового эфира имеет невысокое абсолютное, но все-таки отрицательное значение, следовательно, этот процесс экзотермический.

Такой же вывод очевиден и для реакции образования ДИПЭ в ходе присоединения олефина к спирту.

В отличие от этих 2-х реакций, энтальпии, полученные для реакций превращения изопропилового спирта в ацетон и пропилен, являются бóльшими по абсолютному значению и положительными, что указывает на их эндотермичность.

Графическое изображение изменения энергии Гиббса от температуры (рис.1) наглядно указывает на то, что образования ДИПЭ в ходе межмолекулярной дегидратации термодинамически более вероятно при пониженных температурах (до 350°C) (реакция b), а в ходе конденсации спирта с пропиленом – во всем интервале температур, т.е. протекает без термодинамических ограничений.

**Таблица 1 –** Численные величины термодинамических функций веществ в стандартных условиях
**Table 1 –** Numerical values of thermodynamic functions of substances under standard conditions

| Соединение | $\Delta H^{\circ}_{298}$, кДж/моль | $\Delta S^{\circ}_{298}$, кДж/моль·К | $C^{\circ}_{p}$ | a | $b\cdot10^{3}$ | $c\cdot10^{6}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *изо*-$C_3H_7OH$ | -272.71 | 310.49 | 89.16 | 8.67 | 303.10 | -115.80 |
| $C_3H_6$ | 20.33 | 267.36 | 64.18 | 12.44 | 188.38 | -47.60 |
| $C_3H_7OC_3H_7$ | -319.03 | 391.25 | 158.95 | 21.01 | 488.80 | -162.50 |
| $C_3H_6O$ | -217.65 | 295.43 | 75.19 | 22.47 | 201.80 | -63.50 |
| $H_2O$ (г) | -241.81 | 188.72 | 33.60 | 30.00 | 10.71 | – |
| $H_2$ | 0 | 130.52 | 28.85 | 27.28 | 3.26 | – |

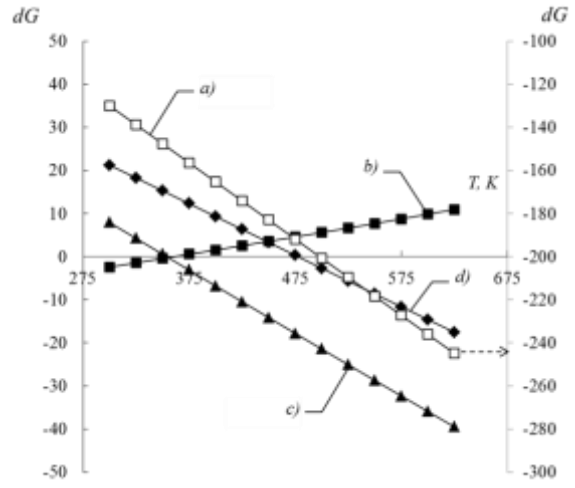



**Рисунок 1 –** Зависимость $\Delta rG^{0}_{T} = f(T)$ для реакций превращения изопропилового спирта в ДИПЭ (*a* и *b*), пропилен (*c*) и ацетон (*d*).
**Figure 1 –** Dependence $\Delta rG^{0}_{T} = f(T)$ for reactions of isopropanol conversion into DIPE (*a* and *b*), propylene (*c*) and acetone (*d*).

В процессе превращения изопропилового спирта в ацетон и пропилен направление реакции смещается вправо при температурах свыше 350 и 475$K$ соответственно.

Вследствие вышеизложенного, ожидаемо, что наибольшие значения констант равновесия характерны для реакции образования ДИПЭ конденсацией изопропилового спирта с пропиленом.

Несмотря на то, что с повышением температуры наблюдается некоторое уменьшение значений константы равновесия данной реакции, тем не менее, она остается очень значительной, что указывает на то, что в указанных условиях равновесие реакции сильно сдвинуто вправо (табл.2). Превращения индивидуального изопропилового спирта в направлении образования ацетона и пропилена характеризуется возрастающей от температуры константой равновесия.

**Таблица 2 -** Результаты расчета констант равновесия для реакций превращения изопропилового спирта
**Table 2 -** Results of Calculation of Equilibrium Constants for Isopropyl Alcohol Transformation Reactions

| *T*, K | Реакции превращения изопропилового спирта | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *a)* | *b)* | *c)* | *d)* |
| 300 | $4{,}45\cdot10^{22}$ | 2,671 | 0,042 | 0,020 |
| 325 | $2{,}11\cdot10^{22}$ | 1,712 | 0,210 | 0,116 |
| 350 | $1{,}12\cdot10^{22}$ | 1,171 | 0,830 | 0,525 |
| 375 | $6{,}47\cdot10^{21}$ | 0,842 | 2,736 | 1,942 |
| 400 | $4{,}02\cdot10^{21}$ | 0,631 | 7,768 | 6,117 |
| 425 | 2,64 · 1021 | 0,488 | 19,489 | 16,850 |
| 450 | 1,82 · 1021 | 0,388 | 44,089 | 41,497 |
| 475 | 1,31 · 1021 | 0,316 | 91,360 | 92,932 |
| 500 | 9,68 · 1020 | 0,261 | 175,621 | 191,867 |
| 525 | 7,37 · 1020 | 0,220 | 316,392 | 369,252 |
| 550 | 5,75 · 1020 | 0,187 | 538,697 | 668,449 |
| 575 | 4,57 · 1020 | 0,161 | 872,842 | 1146,799 |
| 600 | 3,7 · 1020 | 0,140 | 1353,638 | 1876,234 |
| 625 | 3,04 · 1020 | 0,122 | 2019,055 | 2942,675 |

Данные таблицы 3 также указывают на то, что с ростом температуры процесса константа равновесия образования ДИПЭ в ходе межмолекулярной дегидратации смещается влево, в сторону исходных веществ.

Расчет состава равновесной смеси для конкретно рассматриваемой реакции межмолекулярной дегидратации до ДИПЭ от температуры проводился согласно закону действующих масс:

2 изо-$C_3H_7OH$ ↔ $C_3H_7OC_3H_7$ + $H_2O$

$2 \cdot (1-\alpha)$ $\alpha$ $\alpha$

Общее число молей равно 2. Материальный баланс соединений в реакционной смеси определяются по выражениям:

$N_{изо\text{-}проп} = 1-\alpha$; $N_{ДИПЭ} = \frac{\alpha}{2}$; $N_{H2O} = \frac{\alpha}{2}$.

Подставляя мольные доли, получаем промежуточное выражение для константы равновесия (табл.4).

Полученные для всех 4-х реакций выражения приведены в табл.5.

Степень превращения от температуры и состав получаемой равновесной реакционной смеси представлены также на рис.2.

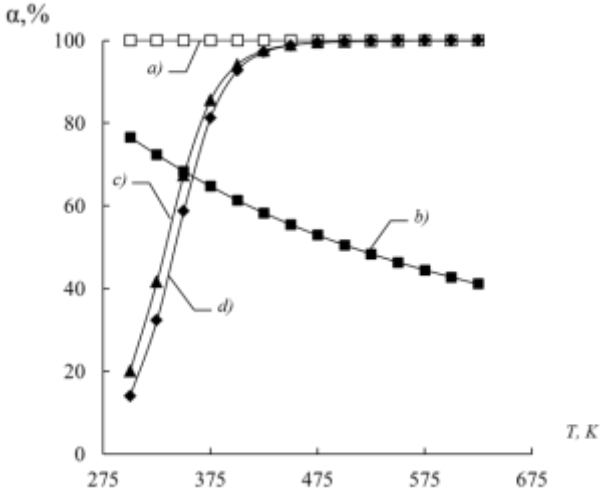



**Рисунок 2** – Влияние температуры на степень превращения (суммарный равновесный выход продуктов) в реакциях превращения изопропилового спирта в ДИПЭ (*a* и *b*), пропилен (*c*) и ацетон (*d*).
**Figure 2 –** Effect of temperature on the degree of conversion (total equilibrium yield of products) in the reactions of isopropyl alcohol conversion to DIPE (a and b), propylene (c), and acetone (d).

**Таблица 3 –** Изменение термодинамических функций для реакций (*a-d*)
**Table 3 –** Changing thermodynamic functions for reactions (*a-d*)

| Реакция | $\Delta H^{\circ}_{298}$, кДж/моль | $\Delta S^{\circ}_{298}$, кДж/моль·К | Коэффициенты уравнения $\Delta\, rC_p = f(T)$ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\Delta a$ | $\Delta b \cdot 10^3$ | $\Delta c \cdot 10^6$ |
| *a)* | -25,99 | 348,12 | 25,08 | 0,0374 | -94,3 |
| *b)* | -15,42 | -41,04 | 33,67 | -106,69 | 69,43 |
| *c)* | 50,9 | 145,59 | 33,77 | -104 | 68,2 |
| *d)* | 55,06 | 115,46 | 41,08 | -98 | 52,3 |

**Примечание:** буквенные обозначения реакций приведены в соответствии с показанной в методике эксперимента

**Таблица 4 –** Расчет константы равновесия и равновесного состава смеси
**Table 4 –** Calculation of the equilibrium constant and the equilibrium composition of the mixture

| | **Реакция** | **Константа равновесия** | **Равновесное превращение** |
|---|---|---|---|
| ***a)*** | *изо*-$C_3H_7OH + C_3H_6 \rightarrow C_3H_7OC_3H_7$ | $K_p = \frac{\alpha}{(1-\alpha)^2}$ | $\alpha = \frac{(2K+1) \pm \sqrt{(4K+1)}}{2K}$ |
| ***b)*** | 2*изо*-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_7OC_3H_7 + H_2O$ | $K_p = \frac{\alpha^2}{4(1-\alpha)^2}$ | $\alpha = \frac{-8K \pm \sqrt{64K^2+16K(1-4K)}}{2(1-4K)}$ |
| ***c)*** | *изо*-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_6 + H_2O$ | $K_p = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}$ | $\alpha = \frac{\pm\sqrt{4K(1+K)}}{2(1+K)}$ |
| ***d)*** | *изо*-$C_3H_7OH \rightarrow C_3H_6O + H_2$ | $K_p = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}$ | $\alpha = \frac{\pm\sqrt{4K(1+K)}}{2(1+K)}$ |

В зависимости от направления реакции степень превращения сырья от температуры можно проиллюстрировать следующими последовательностями:

при 300*K* $a > b > c > d$;

при 400*K* $a > c > d > b$;

при 500*K* и выше $a, c, d > b$.

Как видно из табл.5, реакция конденсации изопропилового спирта с пропиленом даже при комнатной температуре сопровождается полным превращением в целевой продукт - ДИПЭ. Анализ результатов выхода ДИПЭ в ходе реакции межмолекулярной дегидратации в исследуемом температурном интервале свидетельствует о том, что для его получения наиболее предпочтительной является область низких температур (300-400К). В этих условиях максимальный теоретический выход ДИПЭ составляет 30-38%. Следует обратить внимание, что в случае превращения индивидуального изопропилового спирта при температурах выше 350*K* существенный вклад начинают вносить реакции, сопровождающиеся образованием пропилена и ацетона. В условиях параллельного протекания реакций превращения изопропилового спирта (за исключением конденсации с пропиленом) при 300К теоретически наиболее вероятным является образование ДИПЭ (38,28%) > пропилена (16,75%) > ацетона (12,32%), тогда как при 400К и выше – пропилена (48,49%) > ацетона (48,1%) > ДИПЭ (30,69%

**Таблица 5 –** Равновесный состав превращения изопропилового спирта
**Table 5 –** Equilibrium composition of the transformation of isopropyl alcohol

| | Содержание компонентов в равновесной смеси продуктов, % мольн. | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *a*) изо-$C_3H_7OH$ + $+C_3H_6 \rightarrow$ $\rightarrow C_3H_7OC_3H_7$ | *b*) 2 изо-$C_3H_7OH \rightarrow$ $\rightarrow C_3H_7OC_3H_7 +$ $+ H_2O$ | | | *c*) изо-$C_3H_7OH \rightarrow$ $\rightarrow C_3H_6 + H_2O$ | | | *d*) изо-$C_3H_7OH \rightarrow$ $\rightarrow C_3H_6O + H_2$ | | |
| *T*, K | $N_{эфир}$ | $N_{спирт}$ | $N_{эфир}$ | $N_{вода}$ | $N_{спирт}$ | $N_{пропилен}$ | $N_{вода}$ | $N_{спирт}$ | $N_{ацетон}$ | $N_{водород}$ |
| 300 | 100 | 23,426 | 38,287 | 38,287 | 66,497 | 16,751 | 16,751 | 75,356 | 12,322 | 12,322 |
| 325 | 100 | 27,646 | 36,177 | 36,177 | 41,205 | 29,398 | 29,398 | 51,195 | 24,403 | 24,403 |
| 350 | 100 | 31,606 | 34,197 | 34,198 | 19,511 | 40,244 | 40,244 | 26,051 | 36,975 | 36,975 |
| 375 | 100 | 35,269 | 32,366 | 32,366 | 7,772 | 46,114 | 46,114 | 10,345 | 44,827 | 44,827 |
| 400 | 100 | 38,631 | 30,685 | 30,685 | 3,027 | 48,487 | 48,487 | 3,784 | 48,108 | 48,108 |
| 425 | 100 | 41,705 | 29,148 | 29,148 | 1,251 | 49,375 | 49,375 | 1,441 | 49,279 | 49,279 |
| 450 | 100 | 44,514 | 27,743 | 27,743 | 0,561 | 49,720 | 49,720 | 0,595 | 49,702 | 49,702 |
| 475 | 100 | 47,085 | 26,458 | 26,458 | 0,272 | 49,864 | 49,864 | 0,267 | 49,866 | 49,866 |
| 500 | 100 | 49,444 | 25,278 | 25,278 | 0,142 | 49,929 | 49,929 | 0,130 | 49,935 | 49,935 |
| 525 | 100 | 51,618 | 24,191 | 24,191 | 0,0789 | 49,961 | 49,961 | 0,068 | 49,966 | 49,966 |
| 550 | 100 | 53,630 | 23,185 | 23,185 | 0,046 | 49,977 | 49,977 | 0,037 | 49,981 | 49,981 |
| 575 | 100 | 55,502 | 22,249 | 22,249 | 0,029 | 49,986 | 49,986 | 0,022 | 49,989 | 49,989 |
| 600 | 100 | 57,252 | 21,374 | 21,374 | 0,018 | 49,991 | 49,991 | 0,013 | 49,993 | 49,993 |
| 625 | 100 | 58,897 | 20,552 | 20,552 | 0,012 | 49,994 | 49,994 | 0,008 | 49,996 | 49,996 |

**Примечание:** буквенные обозначения реакций приведены в соответствии с показанной в методике эксперимента

Таким образом, результаты теоретического анализа превращения изопропилового спирта показали, что, учитывая результаты изменения энергии Гиббса от температуры, реакция образования ДИПЭ в ходе конденсации спирта с пропиленом во всем интервале температур протекает без термодинамических ограничений. В ходе межмолекулярной дегидратации до ДИПЭ процесс термодинамически более вероятен при пониженных температурах (до 350*K*), тогда как в процессе превращения изопропилового спирта в ацетон и пропилен направление реакции смещается вправо при температурах свыше 350 и 475*K* соответственно. При параллельном протекании реакций превращения изопропилового спирта (за исключением конденсации с пропиленом) при 300К теоретически наиболее вероятным является образование ДИПЭ (38,28%) > пропилена (16,75%) > ацетона (12,32%), тогда как при 40*0K* и выше – пропилена (48,49%) > ацетона (48,1%) > ДИПЭ (30,69%).

## REFERENCES

1. **Guseinova E.A., Adzhamov K.Yu.** Thermodynamic calculation of conversion of aliphatic alcohols ($C_1$-$C_4$). *Processes of Petrochemistry and Oil Refining,* №2 (38), T.10, 2009. - c.171-181 *(in English)*
2. **Gyulmaliev A.M., Tretyakov V.F., Talyshinskij R.M., Ilolov A.M., Hadzhiev S.N.** Teoreticheskie aspekty reakcij prevrashcheniya etilovogo spirta i dimetilovogo efira v 1,3-butadien. *Neftekhimiya,* 2019, T. 59, № 5, s. 529-537 *(in Russian)*
3. **Zajnullin R.Z., Koledin K.F., Gubajdullin I.M., Ahmetov A.F., Koledin S.N.** Kineticheskaya model kataliticheskogo riforminga benzina s uchetom izmeneniya reakcionnogo obyema i termodinamicheskih parametrov. *Kinetika i kataliz*, 2020, T. 61, № 4. - s. 550-559 *(in Russian)*
4. **Zhorov Yu.M.** Termodinamika himicheskih processov. M.: Himiya, 1985. - 464 s. *(in Russian)*
5. **Ravdel A.A., Ponomareva A.M.** Kratkij spravochnik fiziko-himicheskih velichin. L.: *Himiya*, 1983. - 231 s. *(in Russian)*
6. **Kolesnikov I.M., Vinokurov V.A.** Termodinamika fiziko-himicheskih processov. M.: *Neft i gaz*, 2005. - 480 s. *(in Russian)*

# Structural Design of Cyber-Physical Systems Based on the "Industry 4.0" Platform

**T.K. Asgarov[1], N.A. Ragimova[2], V.H. Abdullayev[2]**

[1]*Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*
[2]*Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave. 34, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Asgarov Taleh / e-mail: taleh.naa@gmail.com

**Abstract**

The article examines the essence and components of the "Industry 4.0" platform. For this purpose, the structural design of the cyber-physical system is made. It also studies a "human-machine" interaction scheme between devices and users. It also looks at applications of cyber-physical systems.

**Keywords:** Industry 4.0, cyber-physical system, Internet of things, "human-machine" interface

**DOI:** DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_87_95

***Received*** *21.01.2022*
***Revised*** *16.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Asgarov T.K., Ragimova N.A., Abdullayev V.H.*
[Structural design of cyber-physical systems based on the "Industry 4.0" platform]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 87-95 *(in Azerbaijani)*

# "Sənaye 4.0" platformasına əsaslanan kiber-fiziki sistemlərin struktur layihələndirilməsi

**T.K. Əsgərov[1], N.Ə. Rəhimova[2], V.H. Abdullayev[2]**

*[1] Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)*
*[2]Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 34, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

**Yazəşma üçün:**
Əsgərov Taleh / e-poçt: taleh.naa@gmail.com

**Xülasə**

Məqalədə "Sənaye 4.0" platformasının mahiyyəti və tərkib hissələri araşdırılır. Bu məqsədlə kiber-fiziki sistemin struktur layihələndirilməsi həyata keçirilir. Bundan əlavə qurğular və istifadəçilər arasında "insan-maşın" tipli qarşılqlı əlaqə sxemi şərh edilir. Həmçinin burada kiber-fiziki sistemlərin tətbiq sahələrinə baxılır.

**Açar sözlər:** "Sənaye 4.0", kiber-fiziki sistem, əşyaların İnterneti, "insan-maşın" interfeysi

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_87_95

**УДК:** 004.273

# Структурное проектирование киберфизических систем на базе платформы «Индустрия 4.0»

**Т.К. Аскеров[1], Н.А. Рагимова[2], В.Г. Абдуллаев[2]**

*[1] Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*
*[2]Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг 34, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Аскеров Талех / e-почта: taleh.naa@gmail.com

**Аннотация**

В статье рассматриваются сущность и составные части платформы «Индустрия 4.0». С этой целью осуществляется структурное проектирование киберфизической системы. Излагаются схема взаимодействия типа «человек-машина» между устройствами и пользователями. Также рассматриваются область применения киберфизических систем.

**Ключевые слова:** «Индустрия 4.0», киберфизическая система, Интернет вещей, «человеко-машинный» интерфейс.

**Giriş**

İnformasiya-kommunikasiya texnologiyalarının (İKT) sürətli inkişafı və funksional baxımdan yeni olan informasiya sensorlarının meydana çıxması fiziki obyektlərin birbaşa internet vasitəsilə idarə edilməsi dövrün aktual məsələlərindən biridir. Son zamanlar informasiya-ölçmə və idarəetmə sahələrində rəqəmsal transformasiyanın inkişafı yeni nəsil intellektual həllərin – *kiber-fiziki sistemlərin* (cyber-phisical system, CPS) yaranmasına səbəb oldu. Kiber-fiziki sistemlər (KFS) dünyanın sənaye sektorunu əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirmək potensialına malik olmuşdur. Bu cür sistemlərə quraşdırılmış altsistemlərin, sensorların, kommunikasiya şəbəkələrinin və idarəetmə sistemlərinin inteqrasiyası kimi baxmaq olar. Kiber infrastrukturdan istifadənin əsas məqsədi fiziki sistemi (zavod, fabrik və s.) nəzarətdə saxlamaq və idarə etməkdir. KFS-lər eyni vaxtda proqram tərəfindən idarə olunan, fiziki hərəkətləri qəbul edən və yerinə yetirən qurğular şəbəkəsini əhatə edir. Ümumiyyətlə, KFS geniş anlayışdır və hər bir KFS başqa bir KFS-in tərkib hissəsi (altsistemi) rolunda çıxış edə bilər. KFS-lər həm kiçik miqyaslı (məsələn, pilotsuz uçuş aparatı, ərazi üçün "ağıllı" qurğular sistemi), həm də böyük miqyaslı (zavodlar, fabriklər, "ağıllı" şəhərlər) obyektlərdə geniş tətbiq olunur. Bu cür sistemlər, ələlxüsus avtomatlaşdırmanın dördüncü sənaye inqilabı (Industry 4.0) adlanan "Sənaye 4.0" səviyyəsinə keçməsinə təkan vermişdir [1, 2].

"Industry 4.0" (Sənaye 4.0) terminindən ilk dəfə 2011-ci ildə Almaniyada istifadə olunmuşdur. "Sənaye 4.0" - tamamilə avtomatlaşdırılmış rəqəmsal istehsala keçidi təmin edir. Burada internet vasitəsilə real vaxt rejimində və "ağıllı sistemlər" (smart systems) tərəfindən idarə olunan "rəqəmsal sahələr" (digital fields) yaradılır. Nəticədə istehsal sisteminin bütün fəaliyyət sahələri rəqəmsal idarə olunan "intellektual şəbəkə fabrikinə" çevrilir. Beləliklə, maliyyə və maddi resursların səmərəli istifadəsinə nail olunur.

Sənaye inqilablarının təqribən 100 illik fasilələrlə baş verdiyi nəzərə alınarsa, növbəti, yəni dördüncü sənaye inqilabının 2060-2070-ci illərdə baş verəcəyini proqnozlaşdırmaq olar. Əvvəlki inqilablarda əsas xarakteristikaların ədədi silsilə formasında artması baş verirdisə, dördüncü sənaye inqilabında xarakteristikaların həndəsi silsilə ilə artması nəzərdə tutulur. Dördüncü sənaye inqilabı bəzən "Sənaye 4.0" platforması da adlanır.

**"Sənaye 4.0" platformasının mahiyyəti və tərkib hissələri**

"Sənaye 4.0" standartlarına cavab verən istehsal müəssisələrinin bütün avadanlıqları (qurğuları, cihazları) simsiz bağlantı ilə təmin olunmalıdır. Bu isə bütün istehsal prosesini səmərəli idarə etməyə və müvafiq optimal qərarları qəbul etməyə gətirib çıxarır. Dar mənada, "Sənaye 4.0" platforması 2020-ci ilə qədər Almaniya hökümətində kompüterləşdirilməni həyata keçirən "Hi-Tech" adlı layihəsindən götürülmüşdür. Bu layihədə "ağıllı" istehsalın (smart manufacturing) yaradılmasının müasir konsepsiyaları göstərilmişdir [3]. "Ağıllı" istehsalatda əsas konsepsiya ondan ibarətdir ki, burada avadanlıqların idarəolunması və işlənməsi IoT (Internet of Things, əşyaların İnterneti) texnologiyasına əsaslanır. Belə olan halda müəssisənin avadanlıqlarının idarə olunmasının qlobal sənaye şəbəkəsi (Global Industry Network) formalaşdırılır. Geniş mənada isə "Sənaye 4.0" – kiber-fiziki sistemləri, əşyaların İnternetini, bulud hesablamalarını, mobil qurğuları, modelləşdirmə vasitələrini və s. özündə birləşdirməklə avtomatlaşdırmanı operativləşdirir və verilənlərin mübadiləsini sürət-

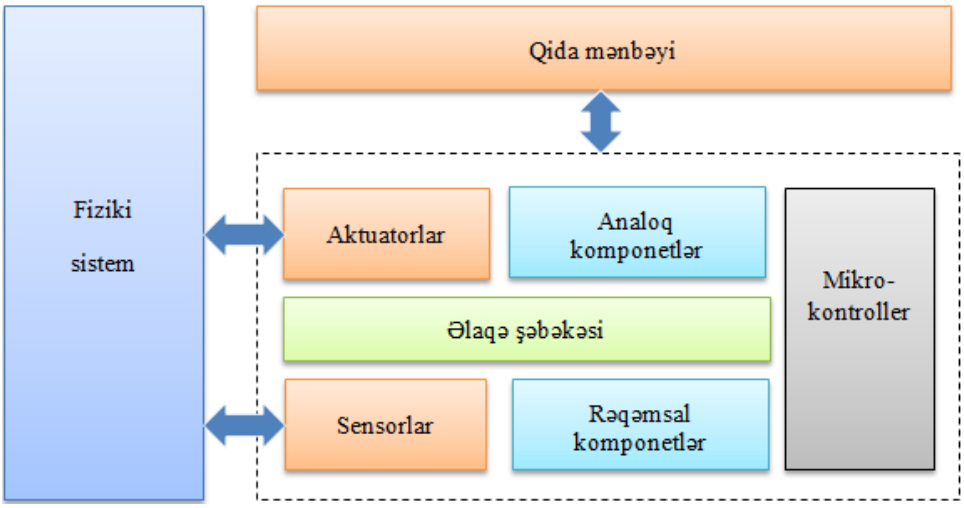
ləndirir. KFS-lər istehsalat proseslərinə tətbiq edilərək istehsal və emaletmə sənayesinin rəqabət gücünü artırır. Bu cür sistemlər fiziki, rəqəmsal və bioloji sahələri özündə birləşdirir. Hal-hazırda əşyaların İnterneti texnologiyaları inkişaf etdikcə İnternetə qoşulan qurğuların qoşulma xərcləri azalır, canlı-cansız aləmə aid nümunələrin şəbəkədəki sayı artır. Əşyaların İnterneti texnologiyasının tam olaraq işləməsi irihəcmli informasiyanın minimal gecikmə ilə sürətli şəkildə ötürülməsindən asılıdır.

"Sənaye 4.0" platformasının konsepsiyası dörd prinsipə əsaslanır. Bunlar aşağıdakılardır:

- insan və qurğuların funksional uyğunluğu. Yəni, İnternet vasitəsilə real vaxt rejimində əlaqə yaratmaq imkanı;
- informasiyanın şəffaflığı və sistemin fiziki aləminin virtual surətinin yaradılması imkanı;
- böyük həcmli verilənlərin (big data) əlaqələndirilməsi və vahid formata gətirilməsi imkanları;
- müxtəlif sistemlərin müstəqil qərar qəbuletmə imkanları.

Hal-hazırda bir çox istehsalçı şirkətlər öz fəaliyyətini "Sənaye 4.0" platforması əsasında həyata keçirirlər [4,5]. Onların vahid konsepsiya çərçivəsində birləşməsi istehsalın dinamikasını dəyişməyə və onun tərkib hissələrini araşdırmağa imkan verir. Mövcud yanaşmaların sintezi, eləcə də inkişaf strategiyalarının prioritetləri və aparılmış elmi təhlillərin nəticələri əsasında dördüncü sənaye inqilabının tərkib hissələrini şəkil 1-də göstərildiyi kimi təklif etmək olar.

**Şəkil 1** – "Sənaye 4.0" platformasının tərkib hissələri
**Figure 1** – Composition of the platform "Industry 4.0"




**Şəkil 2** – Kiber-fiziki sistemin ümumi strukturu
**Figure 2** – General structure of cyber-physical system

*İnformasiya təhlükəsizliyi.* Bir çox sənaye şirkətləri hələ də qlobal şəbəkəyə bağlı olmayan qapalı istehsal idarəetmə sistemlərindən istifadə edir. Sənaye sistemlərinin informasiya təhlükəsizliyini təmin etmək üçün şəbəkə protokollarından istifadə edilir. Nəticədə kibertəhlükəsizlik meyarları əsasında sistemə etibarlı giriş, dayanıqlı rabitə, eləcə də istifadəçilərə və qurğulara düzgün nəzarət həyata keçirilir.

*Bulud hesablamaları.* Bəzi sənaye şirkətləri artıq işlərində qismən bulud proqramlarından istifadə edirlər. Lakin "Sənaye 4.0" platformasının inkişafı ilə bu texnologiya daha çox problemləri həll etmək üçün istifadə ediləcək. Zaman keçdikcə buludda verilənlərin saxlanması texnologiyasının keyfiyyət göstəriciləri yaxşılaşacaq. Sorğulara verilən cavab müddəti azaldılacaq və gələcəkdə istehsal prosesinə nəzarət sistemlərinin işləməsi bütövlükdə bulud texnologiyalarına əsaslanacaq.

*Mobil texnologiyalar.* "Sənaye 4.0" platformasında mobil texnologiyalara əsaslanan komponentlər üstünlük təşkil edir. Belə ki, fiziki obyektdəki sənaye IoT sistemlərindən alınan real zaman verilənləri mobil texnologiyalar vasitəsilə buluda ötürülür. Bu verilənlər buludda Big data texnologiyaları vasitəsilə emal edilir və saxlanır.

*Sistemlərin inteqrasiyası.* Hal-hazırda istifadə olunan informasiya sistemləri tam inteqrasiya edilməmişdir. "Sənaye 4.0" platforması bu şəbəkələrə yenidən baxılmasını tələb edir. Yəni, sistemin fəaliyyət proseslərinin (kommersiya və sənaye) hərtərəfli inteqrasiyası tələb olunur. Bunun üçün yalnız müəssisə daxilindəki müxtəlif səviyyələrdə (şöbələrdə) deyil, istehsal dövründəki müxtəlif tərəfdaş müəssisələr arasında da sıx əməkdaşlıq qurulması vacibdir.

*Rəqəmsal modelləşdirmə.* Müasir dövrdə yeni bir məhsulun hazırlanması mərhələsində obyektlərin, materialların və istehsal proseslərinin 3D modelləşdirilməsi geniş tətbiq olunur. Gələcəkdə bu texnologiya istehsal prosesində geniş istifadə ediləcəkdir ki, bu da fiziki obyektin müvafiq aktual verilənlərini real vaxt rejimində virtual model şəklində təsvir etməsinə imkan verəcək. Beləliklə, avadanlığın quraşdırılması vaxtı əhəmiyyətli dərəcədə azalacaq və məhsulların keyfiyyəti artacaqdır.

*Additiv istehsalat və robototexnika.* Sənayedə 3D çapının tətbiqi və ayrı-ayrı detalların hazırlanması kimi additiv texnologiyalar vasitəsilə həyata keçirilir. "Sənaye 4.0" platformasında additiv metodların meydana gəlməsi ilə unikal məhsulların seriyalı istehsalı üçün geniş imkanlar yaratmışdır. Məsələn, aerokosmik müəssisələr artıq yeni hava gəmiləri yaratmaq üçün additiv texnologiyalardan istifadə etməklə onun çəkisini, ölçüsünü azaldır və bununla da xammal istehlakını minimuma endirir.

Sənaye robotları artıq uzun zaman mürəkkəb məsələlərin icrası üçün müxtəlif sənaye sahələrinin iri müəssisələrində istifadə olunur. Ancaq bu gün robotlar sələflərindən fərqli olaraq getdikcə daha çox müstəqil, çevik və icraçı olurlar. Zaman keçdikcə onlar bir-biri ilə münasibət qurmağa başlayacaq. Onlar nəinki bir insanla yan-yana sakitcə işləyəcək, həm də insana nə isə öyrədəcək.

*Əşyaların İnterneti.* Əşyaların İnterneti KFS ilə əlaqədə vacib konsepsiyadır. Onlar mövcud texnologiyalar əsasında fiziki qurğuların identifikasiyası və virtuallaşdırılmasını həyata keçirir. Bu gün istehsalatdakı avadanlıqların və qurğuların yalnız bir hissəsi İnternetə qoşulmuşdur. İstehsal prosesinin idarə edilməsi iyerarxik strukturu şəklində təşkil olunur. Strukturda aşağı səviyyənin elementləri – sensorlar, periferiya qurğuları və mikrokontrollerlər yuxarı səviyyələrə verilənləri ötürür. Əşyaların İnternetinin köməyilə qurğular müvafiq şəbəkə protokolları ilə təchiz olunur və onların hesablama imkanları artır. Beləliklə, qurğular müstəqil olaraq verilənləri emal edir, idarəetmənin müvafiq səviyyəsində bir-biri ilə qarşılıqlı əlaqə qurur və yalnız lazım olduqda mərkəzləşdirilmiş idarəetmə sisteminə keçid edir.

Böyük verilənlər. Böyük verilənlər IoT-u tamamlayan mühüm texnologiyalardan biridir və böyük, müxtəlif tipli, müxtəlif ölçülü və

strukturlaşdırılmamış verilənlərin emalı üçün alətlər və texnika təqdim edir. Sənaye sahəsində tətbiq olunan böyük həcmli verilənlər məhsulun keyfiyyətini optimallaşdırmağa, enerjiyə qənaət etməyə və avadanlığın iş qabiliyyətini yüksəltməyə icazə verir. Sənaye 4.0 platforması üzərində müxtəlif informasiya mənbələrindən verilənlərin toplanması və emalı (ERP və CRM sistemləri) real vaxt rejimində qərar qəbulunun dəstəklənməsi üçün standart bir vasitə olacaqdır.

***RFID texnologiyalar***

RFID texnologiyası (**Radio Frequency Identification**, radiotezlik identifikasiyası) radiosiqnallardan istifadə edərək obyektlərin (əşyaların, qurğuların) avtomatik identifikasiyası üçün istifadə olunur. İdentifikasiyanı həyata keçirmək üçün RFID çiplər tətbiq olunur. Bu çiplər xüsusi antenlə təchiz olunaraq verilənlərin saxlanması, qəbulu və ötürülməsi emalı üçün radiotezlik siqnallarının modulyasiyasını və demodulyasiyasını icra edir.

*Süni intellekt.* Süni intellektə əsaslanan KFS-lər böyük həcmli verilənləri generasiya edir, onların dəqiq emalını və analizini yerinə yetirir. Süni intellekt proqnozlaşdırma modelləri əsasında sənayenin fəaliyyətinin gələcək dinamikasnı əks etdirir.

Maşınla öyrətmə (machin learning) metodundan istifadə edərək, istehsalçılar alqoritmik həlləri olan sistemlərin məlumatları əsasında proqnozlaşdırma modelləri yarada, istehsal şansını artırmaq üçün istehsal prosesinin əvvəlində hazır məhsulların keyfiyyətini proqnozlaşdıraraq istehsalçılara fayda verə bilərlər. Hər zaman qurğuların necə işlədiyini müəyyən etmək üçün onun verilənləri təhlil edilə bilər.

**Kiber-fiziki sistemin strukturunun layihələndirilməsi**

KFS müxtəlif fiziki obyektlər, altsistemlərdən (komponentlərdən) ibarət olan və müxtəlif sensorlardan gələn əks əlaqələrdən istifadə etməklə idarə edilən sistemlərdir. KFS-in işləməsi hesablama və fiziki proseslərin inteqrasiyası prinsipinə əsaslanır, yəni, fiziki obyektlər sistemin bir hissəsini təşkil edir. Texniki baxımdan, KFS bir çox informasiya-texniki konsepsiyalarla yanaşı "Əşyaların İnterneti" (Internet of Things, IoT), "Sənaye 4.0" (Industry 4.0), "Sənaye Əşyalarının İnterneti" (Industrial Internet of Things, IIoT), maşınlararası qarşılıqlı əlaqə (Machine-to-Machine Interaction, M2M), "bulud", "duman" və "şeh" hesablamaları (cloud computing, fog computing, dew computing ) vasitəsi ilə reallaşdırılan şəbəkə (grid) tipli strukturdur [6, 7].

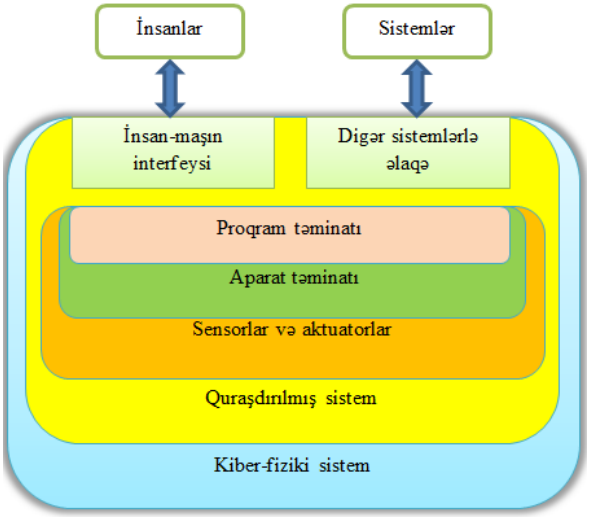
KFS-in ümumi strukturuna sensorlar, kontrollerlər, aktuatorlar və fiziki sistemlər daxildir (şəkil 2). Burada sensorlar fiziki sistemə nəzarət edir və ölçmə nəticələrini mikrokontrollerə çatdırır. Mikrokontroller isə fiziki hərəkətləri yerinə yetirən aktuatorlara idarəetmə siqnalları göndərir. KFS-in bu tərkib hissələri müəyyən məsələnin həlli üçün zaman və məkan baxımından qarşılıqlı əlaqədə olur və vahid mühit formalaşdırır. Fiziki sistemlər böyük qranulyar miqyaslı sistemlərin təkamülünün növbəti pilləsidir. Başqa sözlə, belə sistem bir çox başqa mürəkkəb sistemlər çoxluğundan ibarətdir.

Bu komponentlər aşağıdakılardır:
- qida mənbəyi (batareya, akkumlyator);
- fiziki sistem – fiziki aləmin real obyektləri (zavod, fabrik və s.);
- fiziki sistemlə qarşılıqlı əlaqə interfeysləri – sensorlar, aktuator adlanan idarəedici mexanizmlər və s;
- analoq tipli komponentlər;
- rəqəmsal tipli komponentlər;
- proqram təminatının işlənməsi üçün – mikrokontroller;
- əlaqə şəbəkəsi – internet, telekommunikasiya və ya rabitə şəbəkəsi.

KFS-lər həmçinin insanlar, maşınlar və məhsullar arasında verilənlərin mübadiləsini təmin edir və dəstəkləyir. KFS-in hər bir elementi verilənləri toplamaq və emal etmək qabiliyyətinə malik olub, həmçinin avtonom şəkildə müəyyən məsələlərə nəzarət edir və interfeys vasitəsilə insanlarla qarşılıqlı əlaqə qurur. Burada əsas məqsəd istehsal proseslərinin

optimallaşdırılmasını həyata keçirməkdən ibarətdir. Yəni burada, maşınlar (qurğular) öz kontekstlərini təyin edir, istehsal şərtlərinə uyğunlaşaraq özlərini yenidən konfiqurasiya etməyi bacarır və bir-biri ilə müstəqil şəkildə simsiz əlaqə saxlaya bilir.

Digər maraqlı cəhət isə "ağıllı" fabriklər (smart factories) konsepsiyasıdır ki, bu da bulud texnologiyasından istifadə etməklə idarəetmə nəzarətinin həyata keçirilməsidir. Buna əsaslanaraq qurğular, işçi resurslar və applikasiya sistemləri arasında real vaxt rejimində əlaqə yaratmağa imkan verən "ağıllı" qurğular və ya "ağıllı" obyektlər yaradılır. Belə olan halda KFS-lərdə istehsal sistemlərinin intellektual təşkili, o cümlədən məhsulun xassələri, xərcləri, logistika, təhlükəsizlik və s. yüksək çevikliyini təmin edir. Şəkil 3-də insanlarla qarşılıqlı əlaqə yaratmaq üçün "insan-maşın" interfeyslərdən istifadə edən KFS-in müxtəlif təbəqələri göstərilmişdir.




**Şəkil 3** – Kiber-fiziki sistemlərlə insanlar və maşınlar arasındakı qarşılıqlı əlaqə
**Figure 3** – Interaction between humans and machines via Cyber-Physical Systems

Sistemdə quraşdırılmış kompüterlər və şəbəkələr ətraf mühitdə baş verən fiziki prosesləri qapalı əks-əlaqə hesablamalarına əsaslanaraq izləyir və idarə edir. KFS fiziki proseslərin dinamikasını proqram və şəbəkə ilə inteqrasiya edir. İnteqrasiya olunmuş sistem abstraksiya, modelləşdirmə, layihələndirmə və analiz üsullarını təmin edir. Bu da "Sənaye 4.0" platformasında həyata keçirilən əməliyyatlardakı köklü dəyişikliklərlə istehsal mühitinə də əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. İstehsal planlaşdırılmasından fərqli olaraq istehsal planlarının real vaxt rejimində planlaşdırılmasına imkan yaradır. "Sənaye 4.0" əməkdaşlarla biznes partnyorları arasında daha yaxşı əməkdaşlığın yaradılmasını təmin edir.

## Kiber-fiziki sistemlərin tətbiq sahələri

KFS-in tətbiqləri hər biri xidmətin effektivliyinin və qəbul edilən qərarların səmərəliliyinin artırılması məqsədi ilə saxlanılma, emal və təhlil üçün böyük həcmli verilənlər yaradır [8, 9, 10]. Bu baxımdan KFS-lər aşağıdakı sahələrdə tətbiq olunur:

*Elm və təhsil.* Elektron elm və təhsil mühitində KFS-in inteqrasiyası kontekstinə Big Data analitikası, kiber platformalar və hesablamalar, tətbiqlər, fiziki obyektlər aiddir. Elmi verilənlər – fiziki eksperimentlər, kimyəvi təcrübələrdə müxtəlif sensorlardan alınan verilənlər, bioloji verilənlər, spektral analizin nəticələri, teleskoplardan çəkilmiş fotoşəkillər, tarixi əsərlər, sənədlər, əlyazmalar və s. ola bilər. Bu verilənlər alimlərin bir-birindən uzaqda olan birliklərinə, virtual kollektivlərə və laboratoriyalara da təqdim edilə bilər. Toplanmış verilənlər emal olunaraq yeni biliklərə çevrilir. Elektron təhsil sistemində Big Data və Data Mining texnologiyalarının istifadəsi üstün götürülür. Bu texnologiyalarla lazımlı informasiyanın təhsil alanlara vaxtında çatdırılması, tədris prosesinin təkmilləşdirilməsi, "ağıllı" tədrisin (smart education) hazırlanması, sosial şəbəkələrdən təhsil alanlar haqqında informasiyanın əldə olunması, maarifləndirici prosesin daimi monitorinqinin aparılması və s. imkanlar təklif edir.

*Səhiyyə.* Son zamanlar bir çox səhiyyə sistemləri öz KFS-ni təqdim edir. Məsələn, xəstəxanalarda pasiyentin çarpayısında quraşdırılmış monitorda pasiyentin cari vəziyyətini

təyin edən göstəricilər (təzyiq, ürəyin ritmi və s.), laborator analizlərin nəticələri və s. kimi verilənlər əks etdirilir. Bu gün səhiyyə sisteminin bir çox sahələri izolə edilmiş vəziyyətdə idarə olunur və bunun həlli üçün məhdud sayda proqram tətbiqləri yaradılır. Kardiostimulyatorlar, kompüter tomoqrafiya aparatları və MRT-skanerlər kimi tibbi qurğulara məsafədən kiberhücumlar edilə bilər, bu isə pasiyentlərin həyatını birbaşa təhlükə altında qoya bilər. Gələcəkdə tibbi prosesləri, pasiyentləri və onun fərdi məlumatlarının təhlükəsizliyini yaxşılaşdırmaq üçün səhiyyənin bir çox sahələri şəbəkələşmiş qapalı əks-əlaqəli sistemlərə birləşdiriləcək.

*Sənayenin avtomatlaşdırılması və robototexnika.* Hal-hazırda proseslərin idarəolunması sistemləri (process control systems) KFS-lərin tipik nümunəsidir. Təkrar istehsal texnologiyasında son məhsul hazırlamaq üçün xammal dəyişdirilmə və emal prosesinə yönəldilir. Məhsulun istehsalı zamanı prosesin dəyişənlərini idarə etmək üçün müvafiq metodlar istifadə olunur. Təkrar istehsal özündə kimya, qida, su təmizləmə, enerji və s. kimi sənayeləri birləşdirir. Bunlardan əlavə sənayenin avtomatlaşdırılması prosesinə fiziki infrastrukturun idarə edilməsi və monitorinqi, elektrik enerjisinin istehsalı və paylaşdırılması, tikinti, ekoloji nəzarət mexanizmləri KFS-ə aid edilir.

*Kommunikasiya.* Rəqəmsal idarəetmə, radio spektrlər və fiber-optik kanallar baxımından kommunikasiya sistemləri (rabitə vasitələri) KFS sayıla bilər. Bunlardan əlavə mobil rabitə (cellular backhaul network), sensorlu (sensor networks) və simsiz şəbəkə (wireless networks) mexanizmləri aid edilir.

*Enerji.* Enerjinin istehsalı, paylaşdırılması və optimallaşdırılması KFS-in əsas tətbiq sahələridir. Məsələn, "ağıllı" şəbəkə (smart grid) adlanan sistem elektrik stansiyalarını birbiri ilə əlaqələndirir. Bu texnologiyaya əsasən istehsal olunan elektrik enerjisinin istehlakçılara itkisiz çatdırılması və yükün səmərəli şəkildə paylanması təmin edilir. Bundan əlavə, "ağıllı" binaların (smart buildings) sensorları işıqlandırmanın idarə olunmasını (istilik, ventilyasiya və kondisioner) və təhlükəsizlik (video müşahidə, yanğına nəzarət, evakuasiya) məsələlərini müəyyən edir.

*İnfrastruktur.* İnsanların yaşadığı rəqəmsal cəmiyyətdə müasir infrastrukturun (elektrik, su, qaz, yollar və s.) smart üsullarla təşkili lazımdır. İri miqyaslı sənaye idarəetmə sistemləri cəmiyyətin həyat fəaliyyətinin təhlükəsizliyini təmin edən elektrik enerjisi şəbəkələri, nəqliyyat sistemləri, neft və qaz kəmərləri, su təchizatı şəbəkələri və s. kimi kritik infrastrukturlarda vacib rol oynayırlar. Bu baxımdan KFS-lər aşağıdakı infrastrukturun idarəolunmasına və onlara xidmətlərin göstərilməsinə kömək edir:

- qəza hallarında bərpa (disaster recovery) mexanizminin təşkili;
- strukturda sağlamlığın monitorinqini, (structural health monitoring, SHL);
- su təchizatının optimal idarə olunması və təhlükəsiz monitorinqi (water distribution optimization and safety monitoring).

*İstehsalat.* KFS baxımından istehsalat proseslərinin idarə edilməsi dedikdə, çoxsaylı sensorlar, aktuatorlar, telemetriya blokları, proqramlaşdırılan məntiqi kontrollerlər (Programmable Logic Controller, PLC) və "insan-maşın" interfeysləri nəzərdə tutulur. Belə idarəetmə sistemlərindən biri SCADA adlanır. Həmçinin buraya robotlaşdırılmış avadanlıqlar, texniki görmə imkanlarını, kompüterlə idarəetmə məsələlərini təmin edən istehsalat sistemləri də aid edilir.

*Nəqliyyat.* KFS-in nəqliyyatda tətbiq sahələrinə aşağıdakılar aiddir:

- avtonəqliyyat sistemləri;
- avionika və aerokosmik sənaye;
- liftlər, eskalatorlar və piyada səkiləri;
- yol hərəkətinin idarə olunması.

**Nəticə**

Dördüncü sənaye inqilabı platformasının reallaşdırılması ilə cəmiyyətdəki bir sıra mühüm problemlər öz həllini tapmaqda davam edir. Bu platforma kiber-fiziki sistemləri istehsalat proseslərinə tətbiq edərək istehsal və emaletmə sənayesinin rəqabət gücünü artır-

maq məqsədini güdür. Kiber-fiziki sistemlər "Sənaye 4.0" platformasında idarəetmə, hesablama və kommunikasiya vasitələrilə inteqrasiya edilmiş və qarşılıqlı fəaliyyət göstərən "kiber" və "fiziki" səviyyələrlə qurulan yeni bir yanaşmadır.

Məqalədə əsas məqsəd "Sənaye 4.0" platforması ilə bağlı kiber-fiziki sistemlərin komponentlərini və strukturunu araşdırmağa yönəldilmişdir. Buraya "Sənaye 4.0" platforması əsasında qurulan kiber-fiziki sistemin struktur sxeminin komponentləri tədqiq edilmiş və fiziki obyektlə onlar arasındakı əlaqələr göstərilmişdir. Həmçinin qurğular və insanlar arasında "insan-maşın" interfeysinin təşkili üçün qarşılıqlı əlaqə sxemi qurulmuşdur.

## REFERENCES

1. **Asgarov T.K.** Using cloud technology in the network Internet of things. *Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions* (ISSN: 2674-5224), 2021, Vol 8, No 4, pp. 127-127 *(in Azerbaijani)*
   https://zenodo.org/record/5068497#.Yd1qDP5BzIW
2. **Ragimova N.A, Abdullayev V.H, Asgarov T.K.** Internet of military things: from ancient war to modern war. IJBPAS (ISSN: 2277–4998), 2021, Vol 10, No 11, pp. 1464-1477 *(in English)*
   https://doi.org/10.31032/IJBPAS/2021/10.11.1127
3. **Gardashova L.A., Hasanli N.I.** Analysis of methods based on evolutionary computing. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy* (ISSN 2076-0515), 2018 Vol 10, No 2, pp. 92-99 *(in Azerbaijani)*
4. **Atzori L., Iera A., Morabito G.** The internet of things: A survey, Computer networks, 2010, Vol. 54 No. 15, pp. 2787-2805. *(in English)*
   https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010
5. **Eyisi E., Zhang Z., Koutsoukos X.** Model-based control design and integration of cyberphysical systems: an adaptive cruise control case study, *Journal of Control Science and Engineering*, 2013, Vol. 2013. *(in English)*
   https://doi.org/10.1155/2013/678016
6. **Jin J., Gubbi J., Marusic S.** An information framework for creating a smart city through internet of things, IEEE Internet of Things Journal, 2014, Vol. 1 No. 2, pp. 112-121. *(in English)*
   https://doi.org/10.1109/JIOT.2013.2296516
7. **Lee J., Bagheri B. Kao H.** A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems, Manufacturing Letters, 2015, Vol. 3, pp. 18-23. *(in English)*
   https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001
8. **Sanislav T., Miclea L.** Cyber-physical systems-concept, challenges and research areas, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 2012, Vol. 14 No. 2, pp. 28-33. *(in English)*
9. **Wan J., Zhang D., Zhao S., Yang L.** Context-aware vehicular cyber-physical systems with cloud support: architecture, challenges, and solutions, IEEE Communications Magazine, 2014, Vol. 52 No. 8, pp. 106-113. *(in English)*
   https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6871677
10. Cyber-Physical Systems and Industry 4.0: Properties, Structure, Communication, and Behavior.
    https://www.researchgate.net/publication/332420221_Cyber-Physical_Systems_and_Industry_40_Properties_Structure_Communication_and_Behavior

# Automated Fault Control Panel during Serial Production Equipment of Defense Industry Technology

**R.A. Ibragimov[1], N.M. Svikhnushin[1], A.E. Zeynalova[1]**

[1] *Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Zeynalova Aygun / aygunzeynalova95@gmail.com

**Abstract**

The paper focuses on the control panel for checking the correct functioning of one of the specific mass-produced electronic samples of special equipment of defense industry technology. The rationale for the expediency of designing a control panel using the principles of modularity and the use of built-in control and measurement tools were given. A functional diagram, design features of a simple-to-manufacture, small-sized and low-cost control panel, developed by the authors and implemented in production, with a description of its operating modes were given. In addition to the control panel includes the hardware, special software that automatically controls (or step by step) the entire procedure for monitoring, measuring, visualizing and archiving test results.

**Keywords:** control panel, cyclogram of stimuli, cyclogram of control parameter, testing of electronic equipment, interface, electronic unit, mezzanine technology, automated control system

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_96_103

***Received*** *28.01.2022*
***Revised*** *20.09.2022*
***Accepted*** *21.09.2022*

**For citation:**
*Ibragimov R.A., Svikhnushin N.M., Zeynalova A.E.*
[Automated fault control panel during serial production equipment of defense industry technology]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 96-103 *(in Russian)*

# Müdafiə sənayesi texnikasının seriyalı istehsalı zamanı nasazlıqlara avtomatlaşdırılmış nəzarət pultu

**R.Ə. İbrahimov[1], N.M. Svixnuşin[1], A.E. Zeynalova[1]**

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

**Yazışma üçün:**
Zeynalova Aygün / aygunzeynalova95@gmail.com

**Xülasə**

Məqalədə xüsusi müdafiə sənayesi texnikasının konkret ardıcıllıqla hazırlanan elektron nümunələrindən birinin fəaliyyətinin düzgünlüyünün yoxlanması üçün nəzarət pultu təsvir edilib. Modulluq prinsiplərindən və quraşdırılmış nəzarət və ölçü alətlərindən istifadə etməklə idarəetmə panelinin layihələndirilməsinin məqsədəuyğunluğu məntiqi verilmişdir. İdarəetmə panelinə aparatdan əlavə, test nəticələrinin monitorinqi, ölçülməsi, vizuallaşdırılması və arxivləşdirilməsi üçün bütün proseduru avtomatik idarə edən (və ya addım-addım) xüsusi proqram təminatı daxildir. Müəlliflər tərəfindən işlənib hazırlanmış və istehsalda tətbiq edilən sadə, kiçik ölçülü və iqdisadi cəhətdən səmərəli idarəetmə pultu, onun *i* funksional diaqramı, tərkibi, dizayn xüsusiyyətləri verilmişdir.

**Açar sözlər:** nəzarət pultu, stimulların sikloqramı, kontrol parametrlərinin sikloqramı, radio elektron aparaturasının yoxlanması, interfeys, elektron blok, avtomatlaşdırılmış nəzarət sistemi, mezonin texnologiyası.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_96_103

**УДК:** 621.317.2

# Автоматизированный пульт контроля неисправностей при серийном производстве техники оборонной промышленности

**Р.А. Ибрагимов[1], Н.М. Свихнушин[1], А.Э. Зейналова[1]**

[1] *Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Зейналова Айгюн / e-mail: aygunzeynalova95@gmail.com

**Аннотация**

В статье описывается автоматизированный пульт контроля для проверки правильности функционирования электронных образцов специальной техники оборонной промышленности при их серийном производстве. Дано обоснование целесообразности проектирование пульта с использованием принципов модульности и применения встраиваемых средств контроля и измерений. Приводятся функциональная схема, состав, конструктивные особенности разработанного авторами и внедренного на производстве простого в изготовлении и малогабаритного пульта контроля с описанием режимов его работы. Пульт контроля включает в себя, помимо аппаратной части, специальное программное обеспечение, управляющее в автоматическом режиме (или в пошаговом) всю процедуру контроля, измерения, визуализации и архивации результатов тестирования.

**Ключевые слова:** пульт контроля, циклограмма стимулов, циклограмма параметров контроля, тестирование радиоэлектронной аппаратуры, интерфейс, электронный блок, мезонинная технология, автоматизированная система контроля.

**Введение**

Вооружение и техника оборонной промышленности представляют собой сложные изделия, производство и эксплуатация которых требуют больших затрат и существенным образом зависят от средств контроля, находящихся в эксплуатирующих организациях и на заводах-изготовителях. По оценке изготовителей трудоемкость контрольных операций при производстве сложной техники оборонной промышленности составляет более 30%. В целом затраты, связанные с обнаружением, поиском и устранением неисправности, возрастают в 10-кратном размере при прохождении неисправности через каждый технологический этап и от входного контроля до выявления отказа на этапе эксплуатации [1]. При этом до 50 % от продолжительности диагностических операций занимает время на подключение контрольной аппаратуры [2]. Применение автоматизированных систем контроля позволяет значительно снизить стоимость эксплуатации и в несколько раз уменьшить трудоемкость контрольно-измерительных операций при производстве.

Одним из путей инновационного развития систем стендовых приемосдаточных испытаний авиационной, космической и оборонно-промышленной спецтехники является построение измерительных систем на основе модульных приборов производства "Информтест", выполненных в открытых международных стандартах VXI, LXL, AXLe, которые широко признаны и успешно развиваются в технически развитых странах [3]. В процессе изготовления техники оборонной промышленности изготовляемая аппаратура подвергается многочисленным промежуточным испытаниям. Так, к примеру, финишным этапом сборки изделий являются цеховые испытания, состоящие из двух основных операций: прозвонка цепей с измерением изоляции и контроль правильности функционирования. В этом случае необходимо решать вопрос проверки как поэлементно, так и в составе ячеек, отдельных модулей или печатных плат на соответствие выходных сигналов требованиям нормативно-технической документации. Использование для этих целей дорогостоящих систем, указанных выше, является избыточным вариантом решения проблемы и не всегда экономически целесообразно. Поэтому для решения данной задачи, как правило, силами завода-изготовителя для прозвонки и проверки на функционирование и устранения повреждений собранных блоков и устройств разрабатывается, изготавливается и размещается непосредственно на сборочных участках различное тестовое оборудование [5]. Но современное состояние средств контроля на большинстве заводов-изготовителей характеризуется применением большого разнообразия частных узкоспециализированных пультов и стендов, привязанных практически к каждому контроллируемому изделию, использованием приборов общего назначения. Такой подход приводит к большим затратам на создание, их высокой стоимости и не обеспеченности современных требуемых технических характеристик средств контроля [6].

**Постановка задачи**

Для решения данной проблемы необходимо реализовать построение и проектирование автоматизированного пульта с использованием принципов модульности и применением встраиваемых средств кон-

троля и измерений, что приведет к повышению уровня его характеристик, а также сокращение сроков и затрат на проектирование и изготовление. Пульт контроля, с одной стороны, должен быть достаточно дешевым, конструктивно представлять собой одну сборочную единицу, иметь малые габариты и вес, но с другой стороны, включать в себя, помимо аппаратной части, специальное программное обеспечение, управляющее в автоматическом режиме (или в пошаговом) всю процедуру контроля, измерения и архивации результатов тестирования [4].

**Решение задачи**

Проверка на функционирование заключается в формировании специальных управляющих воздействий (стимулов), соответствующих алгоритму работы проверяемого изделия, последовательно подаваемых на него и сравнения ответных реакций с данными эксплуатационно-технической документации и технических условий. Количество и состав стимулов и реакций зависит от конкретного проверяемого изделия, что определяет необходимый состав унифицированных модулей и соответствующего технологического жгута для подключения к изделию.

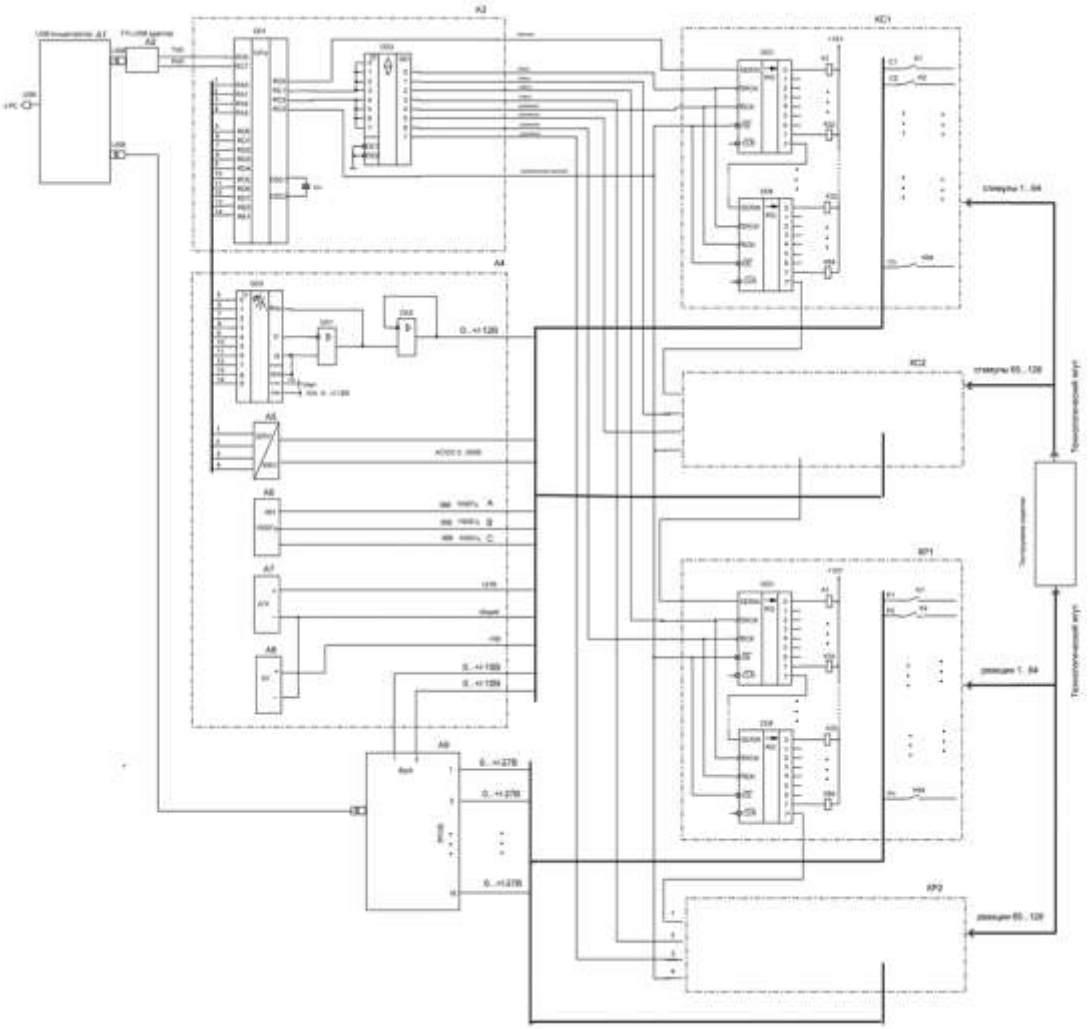


**Рисунок 1** – Пульт контроля. Схема электрическая функциональная
**Figure 1 –** Control panel. Electrical functional diagram

Функциональная схема разработанного и изготовленного нами автоматического пульта для контроля одного из серийно изготавливаемого изделия приведена на рис.1.

Пульт контроля по интерфейсу USB2 подключается к персональному компьютеру (PC) и включает в себя следующие функциональные блоки:

1) A1 USB концентратор;
2) A2 преобразователь TTL-USB;
3) A3 блок управления;
4) A4 блок формирования стимулов;
5) A5…A8 блоки питания;
6) A9 модуль АЦП/ЦАП ZET 220;
7) КС1, КС2 коммутатор стимулов;
8) КР1, КР2 коммутатор реакций.

Коммутатор стимулов состоит из одной или двух печатных плат с программно адресуемыми электромагнитными реле и восьми сдвиговых регистров, служит для подачи 64 или 128 стимулов в проверяемые цепи изделия. Количество плат или стимулов определяется исходя из проверочных таблиц на проверяемые изделия.

Коммутатор реакций служит для коммутации 64-х или 128 реакций изделия и подачи их для измерений на многоканальный АЦП/ЦАП модуль ZET 220.

На ZET 220 производятся измерения параметров реакций контролируемого изделия и передача их в PC для анализа и сравнения с требованиями ТУ.

**Таблица 1 –** Таблица подачи стимулов
**Table 1 –** Stimuli delivery table

| Наименрвание стимула | Характеристика стимула | Наименрвание стимула | Характеристика стимула | Наименрвание стимула | Характеристика стимула |
|---|---|---|---|---|---|
| C1 | 36В 1000Гц | C39 | +1В | C58 | 0…+10В |
| C16 | +27В | C40 | +1В | C59 | 0…-10В |
| C17 | +27В | C41 | корпус | C60 | +27В |
| C19 | +27В | C42 | корпус | C69 | +27В |
| C20 | +27В | C43 | корпус | C71 | +27В |
| C21 | +27В | C44 | +0,5В | C72 | +27В |
| C22 | +27В | C45 | -0,5В | C73 | +27В |
| C23 | +27В | C46 | +0,5В | C74 | +27В |
| C24 | +27В | C47 | -0,5В | C75 | +0,81В |
| C27 | корпус | C48 | +1,5В | C76 | 0…+12В |
| C28 | корпус | C49 | -1,5В | C77 | 0…-12В |
| C29 | корпус | C50 | 0…+12В | C83 | ±12В |
| C30 | +27В | C51 | 0…-12В | C86 | корпус |
| C31 | +27В | C52 | +0,75В | C87 | +27В |
| C34 | +27В | C53 | -0,75В | C89 | корпус |
| C35 | +0,225В | C54 | +1,5В | C90 | +0,25В |
| C36 | +0,225В | C55 | -1,5В | C91 | -0,25В |
| C37 | +1В | C56 | 0…+10В | C92 | +1В |
| C38 | +1В | C57 | 0…-10В | C93 | -1В |

Для коммутации необходимых для проверки стимулов и реакций из PC по USB для каждого номера операций проверок согласно алгоритмам проверок (рис.2) передаются 16 или 32 байта кода стимулов и реакций, которые принимаются микроконтроллером блока управления пульта контроля и транслируются в сдвигающие регистры блоков коммутации стимулов и реакций.

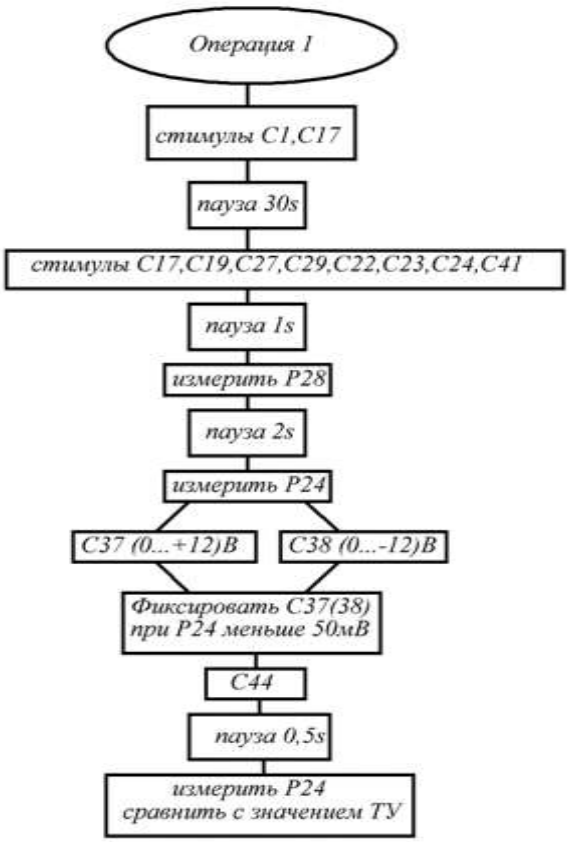



**Рисунок 2 –** Алгоритм проверки операции 1
**Figure 2 –** Cheking algorithm of operation 1

На выходы регистров подключены малогабаритные электромагнитные реле, которые своими контактами подключают необходимые напряжения команд-стимулов на соответствующие контакты разъемов проверяемого изделия (табл.1) и подают напряжения реакций (табл.2) на входы АЦП/ЦАП ZET 220. Измеренные напряжения реакций пересылаются в PC для сравнения их с требуемыми согласно технической документации.

Пульт контроля представляет собой одну сборочную единицу усеченного 19 дюймового конструктива (рис.3) с встроенными печатными платами блоков коммутации стимулов и контроля (рис.4), модуля АЦП/ЦАП ZET 220 и блоков питания.

Питание схем отдельных блоков пульта контроля осуществляется от источника 12В PS-65-12, расположенного внутри пульта.

После запуска на PC программы PultPK.exe в открывшемся окне интерфейса программы (рис.5) необходимо установить номер последовательного порта "COM N", выбрать режим "Автомат" или "Ручной" и нажать кнопку "Старт". Последовательно для каждого номера операции на испытываемое изделие подаются стимулы согласно алгоритма проверок. В столбце "РЕЗУЛЬТАТ" высвечиваются результаты контроля "ИСПРАВНО" или "НЕИСПРАВНО". В столбцах "ПРИМЕЧАНИЕ" высвечиваются неисправные названия цепей и номера их контактов на разъемах проверяемого блока. Кнопкой "Сброс" происходит обнуление результатов проверки.

В режиме "Ручной" возможна активация каждой отдельной операции путем клика мышкой по выбранному номеру в столбце "№ ОПЕРАЦИИ".

**Рисунок 3 –** Пульт контроля. Внешний вид
**Figure 3 –** Control panel. Appearance

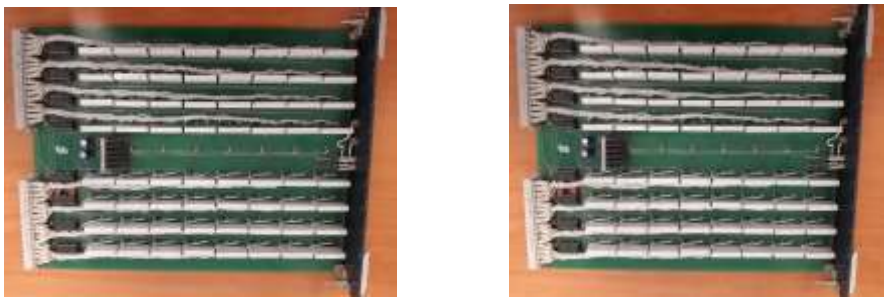


**Рисунок 4 –** Коммутатор стимулов и реакций
**Figure 4 –** Stimuli and action switch

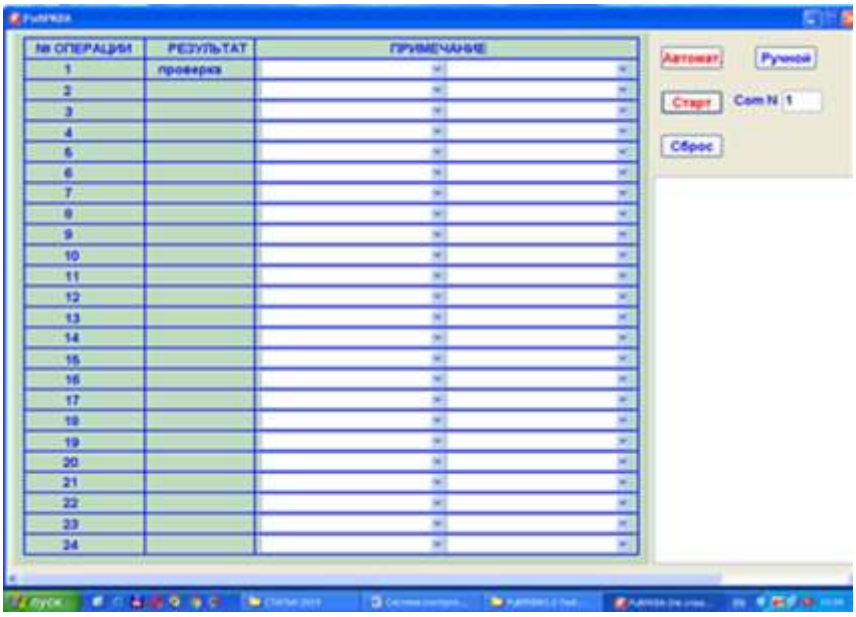



**Рисунок 5 –** Интерфейс программы пульта контроля
**Figure 5 –** Interface program of control panel

**Таблица 2 –** Таблица контроля реакций
**Table 2 –** Table of control reaction

| Наименование реакции | Характеристика стимула | Наименование реакции | Характеристика стимула | Наименование реакции | Характеристика стимула |
|---|---|---|---|---|---|
| P24 | (-12…+12)В | P33 | (-12…+12)В | P45 | (-4…+4)В |
| P25 | (-12…+12)В | P34 | +27В | P46 | (-12…+12)В |
| P26 | (-12…+12)В | P35 | +27В | P47 | (-12…+12)В |
| P27 | +27В | P36 | +27В | P53 | (-12…+12)В |
| P28 | +27В | P37 | корпус | P54 | (-12…+12)В |
| P29 | ±12В | P41 | +27В | P55 | (-12…+12)В |
| P32 | (-12…+12)В | P44 | (-4…+4)В | P56 | (-12…+12)В |

**Заключение**

Применение на финишном этапе общей сборки электронных блоков автоматического пульта контроля позволяет резко сократить время на контроль правильности их функционирования без использования дорогих автоматизированных проверочных комплексов.

В настоящее время по предложенной схеме изготовлены и внедрены в эксплуатацию ряд пультов контроля для проверки на функционирование и цеховых испытаний составных частей специальной техники на одном из предприятий Министерства оборонной промышленности Азербайджана.

## REFERENCES

1. **Davydov P.S.** Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnyh ustrojstv i sistem. M.: *Radio i svyaz*, 1988. – 258 s. *(in Russian)*

2. **Suskin V.V., Dubov A.V., Kapranov A.P.** Obzor sovremennyh sredstv avtomatizacii poiska neispravnostej v elektronnyh ustrojstvah // *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2010. № 2. – S. 86-100 *(in Russian)*

3. **Zajchenko S.N.**Opyt razrabotki kontrolno-izmeritelnyh sistem na baze rossijskih modulnyh priborov v otkrytyh standartah VXI, LXI, AXIe. *Aviacionnoe priborostroenie*, №2, 2015, s. 64 *(in Russian)*

4. **Gregory Mitchell, Marvin Conn** Automated Data Acquisition for a Prognostics and Diagnostics Health Monitoring System *(in English)*

5. **Kusta Iyudu.** Nadezhnost, kontrol i diagnostika vychislitelnyh mashin i sistem: ucheb. posobie dlya vuzov po spec. *«Vychislitelnye mashiny, kompleksy, sistemy i seti» (*in Russian*)*

6. **Guliyev H.B**. Method of intellectual control of the stream of reactive power in load nodes of the power supply system on the basis of fuzzy-logic. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. Vol. 7, №1, 2015 *(in Azerbaijan)*

# The Dielcometric Method of Measurement of Soil Moisture

(TDR method)

**K.A. Asgarov[1], A.V. Mardakhayev[1], A.Sh. Khidirov[2]**

[1] *Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency of Azerbaijan (S.S. Akhundov str. 1, Baku, AZ 1115, Azerbaijan)*
[2] *Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Mardaxayev Anatoliy / e-mail: mavica@yandex.ru

**Abstract**

Taking into account the fact that the TDR (Time Domain Reflectometry) - method is based on the technique of fault detection in cable lines, the article briefly describes the methodology of fault location in them, specifies the composition of the equipment, considers classical variants of TDR probe designs, gives the equations recommended for conducting the geometric coefficient analysis of probes, gives recommendations for probe design and their application. The calibration equations obtained by G. Topp in co-authorship and Maxwell De Loor for calculations for determination of soil moisture content are presented and recommendations for application of these equations are given. We consider it necessary to note that the recommendations stated in the article will serve as an informative guide to the technical aspects in conducting measurements of soil dielectric permittivity and volumetric water content using TDR equipment both for novice researchers and for experts.

**Keywords:** reflectometr, geometric coefficient, dielectric permittivity, volumetric water content, equations G. Topp coauthored and Maxwell De Loor.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122

***Received*** *15.04.2022*
***Revised*** *16.09.2022*
***Accepted*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Asgarov K.A., Mardakhayev A.V., Khidirov A.Sh.*
[The dielcometric method of measurement of soil moisture (TDR method)]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 104-122 *(in English)*

# Torpaqların rütubətliliyinin ölçülməsinin dielkometrik metodu
(TDR metod)

**K.Ə. Əsgərov[1], A.V. Mardaxayev[1], A.Ş. Xidirov[2]**
[1] *MAKA-nın Elmi-Tədqiqat Aerokosmik İnformatika İnstitutu (S.S. Axundov küç. 1, Bakı , AZ 1115, Azərbaycan)*
[2] *Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**
Mardaxayev Anatoliy / e-mail: mavica@yandex.ru

**Xülasə**

TDR metodunun, elektrik kabel xətlərində zədələnmiş yerlərin aşkar edilməsi metodikasına əsaslandığını nəzərə alaraq, məqalədə, onlarda zədələnmələrin axtarışı metodikası şərh edilmiş və avadanlıqların tərkibi göstərilmişdir. TDR zondlarının konstruksiyalarının klassik variantlarına baxılmış, zondların həndəsi əmsalının analizini aparmaq üçün tövsiyə edilən tənliklər təsvir edilmiş, zondların layihələndirilməsi və onların tətbiqinə aid tövsiyələr verilmişdir. Torpağın rütubətliliyinin təyinində hasablamaların aparılması üçün G. Topp-un həmmüəlliflərlə və Maxwell De Loor-un təklif etdikləri kalibrləmə tənlikləri təqdim edilmiş və bu tənliklərin tətbiqinə aid tövsiyələr verilmişdir. Qeyd etməyi lazım bilirik ki, məqalədə şərh edilmiş tövsiyələr, həm gənc tədqiqatçılara və həm də ekspertlərə, TDR avadanlığın köməyilə torpağın dielektrik nüfuzluğunun və ondakı suyun həcmi miqdarının ölçmələrinin aparılmasının texniki aspektlərini əks etdirən informativ bir rəhbərlik kimi xidmət göstərə bilər.

**Açar sözlər***:* reflektometr, həndəsi əmsal, dielektrik nüfuzluğu, suyun həcmi miqdarı, G. Topp-un həmmüəlliflərlə və Maxwell De Loor-un tənlikləri.

**DOI:** DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122

**УДК** 631.421

# О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы
(TDR метод)

**К.А. Аскеров[1], А.В. Мардахаев[1], А.Ш. Хидиров[2]**
[1] *Научно Исследовательский Институт Аэрокосмической Информатики НАНА (ул. С.С. Ахундова 1, Баку, AZ 1115, Азербайджан)*
[2] *Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг 16/21, г. Баку, AZ 1010, Азербайджан)*

**Для переписки:**
Мардахаев Анатолий / e-mail: mavica@yandex.ru

**Аннотация**

Учитывая то, что TDR метод основан на методике по обнаружению повреждений в кабельных линиях, в статье кратко изложена методика проведения работ по поиску в них повреждений, указан состав оборудования, Рассмотрены классические варианты конструкций зондов TDR, приведены уравнения, рекомендуемые для проведения анализа геометрического коэффициента зондов, даны рекомендации по конструированию зондов и их применению. Приведены калибровочные уравнения, полученные G. Topp в соавторстве и Maxwell De Loor для проведения расчётов по определению влажности почвы и даны рекомендации по применению этих уравнений. Считаем необходимым отметить, что рекомендации, изложенные в статье, послужат информативным руководством по техническим аспектам при проведении измерений диэлектрической проницаемости почвы и объемного содержания воды с использованием TDR оборудования как для начинающих исследователей, так и для экспертов.

**Ключевые слова:** рефлектометр, геометрический коэффициент, диэлектрическая проницаемость, объёмное содержание воды, уравнения G. Topp в соавторстве и Maxwell De Loor.

**Введение**

Последние достижения в области спутниковых измерений влажности почвы играют важную роль в экологических приложениях, таких как метеорология, гидрология, сельское хозяйство, управление водными ресурсами и климатология. Тем не менее, для обеспечения проведения качественных измерений по-прежнему необходимо подтверждать данные спутникового дистанционного зондирования данными, полученными *in situ*.

Среди методов получения данных о влажности почвы *in situ,* привлекающих широкое внимание исследователей, можно назвать **рефлектометрию во временной области** (**Time-Domain Reflectometry - TDR**), ставшую одним из наиболее используемых методов. Согласно названию, метод TDR основан на определении времени распространения электромагнитного (ЭМ) импульса вдоль датчика (зонда), проложенного в почве или другой измеряемой среде. ЭМ сигнал в виде ступенчатого напряжения, составляющего около 0,6 *В* [1], подается в линию электропередачи (зонд) от TDR-модуля, который затем измеряет время прохождения сигнала по линии электропередачи. Это время прохождения импульса напрямую связано со скоростью распространения сигнала в почве, когда длина линии электропередачи известна (длина зонда, расположенного в почве).

**Цель работы** – обобщить и изучить рекомендации, разработанные исследователями в процессе проведения исследований по измерению диэлектрической проницаемости почвы $\varepsilon$ и объемного содержания в ней воды $\theta$.

**Методика проведения работ по обнаружению повреждений в кабельных линиях**

Рефлектометрия во временной области – это быстрая, точная и безопасная технология с использованием кабельного тестера. В 30-х годах XX века указанный метод был разработан и применён для проведения работ по поиску повреждений в кабельных линиях, в том числе и для определения расстояния до места обрыва кабеля. Оборудование, используемое для тестирования кабеля, измеряет время между запуском ЭМ волн и обнаружением на графике точек расположения их отражений.

Генератор импульсов генерирует ЭМ волны, которые распространяются по коаксиальному кабелю. Их отражения синхронизируются с помощью сэмплера, смежного с генератором импульсов, а данные в виде сигнала TDR отображаются на осциллографе. Обычно генератор, сэмплер и осциллограф размещаются в одном приборе, называемом «**рефлектометр**», или «**кабельный тестер**». Последний термин используется электротехниками, как правило, при тестировании коаксиальных кабелей. Наиболее распространенными рефлектометрами, используемыми на сегодняшний день, являются модели 1502B и 1502C (цифровые модели) производства Tektronix из Бивертона, штат Орегон (рис.1). Указанные генераторы генерируют импульсы напряжения от 0 до 0,225 *В* за время нарастания < 200 *пс*.

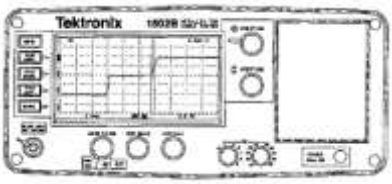



**Рисунок 1 –** Кабельный тестер (рефлектометр)
**Figure 1** - Cable tester (reflectometer)

На рис. 2 приведена схема рефлектометра во временной области (TDR) и внутренние соединения между компонентами: генератор ступенчатых импульсов (step pulse generator), коаксиальный кабель (coaxial cable), сэмплер (sampler) и осциллограф (oscilloscope) или любой другой прибор для отображения и записи диаграммы [2].

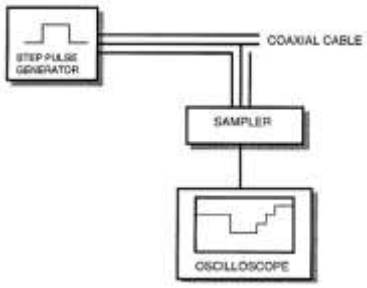



**Рисунок 2 –** Схема рефлектометра во временной области и внутренние соединения между компонентами [2]
**Figure 2 -** Time domain reflectometer diagram and internal connections between components [2]

Следует отметить, что ЭМ волна состоит из электрической и магнитной частей. Электрическая часть ЭМ волн состоит из синусоидальных волн, охватывающих большой частотный диапазон, и поэтому важно какие частоты вырабатывает генератор. Если синусоидальную волну наложить на гармонические синусоидальные волны, вырабатываемые генератором, в котором самая высокая частота стремится к бесконечности, то в результате будет получена идеальная периодическая прямоугольная волна. Это то, что происходит в генераторе ступенчатых импульсов, то есть электрические части ЭМ волн создают периодическую прямоугольную волну, называемую **шагом напряжения**. В действительности же, существует технически зависимый верхний предел для самой высокой частоты, который может быть получен генератором ступенчатых импульсов, и поэтому прямоугольные волны становятся приблизительно квадратными [2]. Для кабельных тестеров Tektronix 1502B или 1502C, наиболее часто используемых в почвоведении, амплитуда электрической части ЭМ волн (ступени напряжения) в зависимости от времени выглядит так (рис. 3) [2]:

**Рисунок 3 –** Амплитуда электрической части ЭМ волн (ступеней напряжения), создаваемые Tektronix 1502B или 1502C, в зависимости от времени
**Figure 3 -** Amplitude of electric part of EM waves (voltage stages) created by Tektronix 1502V or 1502C, depending on time

Ступени напряжения, создаваемые Tektronix 1502B или 1502C, в зависимости от времени, производятся по следующей схеме (рис. 3): один шаг напряжения передается в течение периода 10 *мкс*, после чего возникает пауза в передаче, продолжающаяся 50 *мкс*. При этом требуется менее 200 *пс*, чтобы напряжение поднялось с 0 *В* до 0,225 *В* или упало с 0,225 *В* до 0 *В*. Это время, называемое временем нарастания ступеней напряжения, является функцией самой высокой частоты синусоидальных волн, которые создают ступени напряжения [2].

Генератор ступенчатых импульсов и сэмплер, соединённые между собой коаксиальным кабелем (рис. 2), также известным как антенный провод. Для справки: разработчиком коаксиального кабеля был С.А. Щелкунов (Sergey Alexander Schelkunoff, 1897-1992) – американский математик и теоретик электромагнетизма рус-

ского происхождения, внесший значительный вклад в теорию антенн.

Согласно ЭМ теории, *«структура, предназначенная для направления волны по заданному пути, называется* ***волноводом****»* [3]. Простейшим типом волновода является коаксиальная линия, изображённая на рис. 4. Проводники кабеля (рис. 4 (б)) состоят из сердечника, расположенного по оси, и коаксиально расположенной металлической цилиндрической трубки (экран). Для того чтобы кабель был гибким, экран обычно изготавливают из металлических плетеных нитей. Как правило, экран и сердечник разделены материалом, в качестве которого обычно применяют диэлектрик (полиэтилен), являющийся средой распространения ЭМ волн. Коаксиальная линия, используемая в рефлектометре Tektronix 1502B или 1502C, имеет характеристическое сопротивление $Z = 50 Ом$ [2].

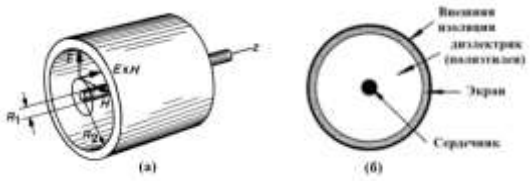



**Рисунок 4 –** Коаксиальная линия: (а) - предполагается, что волна распространяется в положительном направлении по оси $Z$; $E$ - напряженность электрического поля; $H$ - напряженность магнитного поля; $R_1$ и $R_2$ - соответственно, радиусы сердечника (центральный проводник) и экрана (внешний проводник); (б) – сечение коаксиального кабеля [3]**.**

**Figure 4 -** Coaxial line: (a) - it is assumed that the wave propagates in the positive direction along the axis; - electric field strength; - magnetic field strength; and - respectively, the radii of the core (price-minesweeper) and the screen (external conductor); (b) - section of coaxial cable [3].

Коаксиальные кабели можно использовать как с постоянным, так и с переменным током. За пределами линии существует нулевое электрическое поле. По причине того, что по внешнему проводнику проходит тот же ток, что и по сердечнику, магнитное поле также равно нулю (рис. 5) [3].

**Рисунок 5 –** Коаксиальная линия: $E$ - напряженность электрического поля; $B$ - магнитная индукция; $I$ - электрический ток

**Figure 5 -** Coaxial line: $E$ - electric field strength; $B$ - magnet-nation induction; $I$ - electric current

Когда генератор начинает передавать ЭМ волны, то они, распространяясь в кольцевой области между двумя коаксиально расположенными проводниками, поступают в сэмплер. Необходимо отметить, что ЭМ волны в кабеле движутся с огромной скоростью. Так, если бы между проводником и экраном был вакуум, то ЭМ волны в кабеле распространялись бы со скоростью света: $3 \cdot 10^8 м/с$ (свет - это ЭМ волна, скорость распространения в вакууме которой постоянна) [3]. Так как диэлектрик, используемый в коаксиальном кабеле, представляет собой полиэтилен, то волны в нём распространяются со скоростью равной 66 % от скорости света [2]. Именно поэтому временной интервал между передачей волн и их обнаружением сэмплером весьма короткий.

Сэмплер обычно состоит из двух компонентов: высокоточного устройства синхронизации и высокоточного вольтметра. Когда ЭМ волны, запускаемые генератором, обнаруживаются сэмплером, то высокоточный вольтметр начинает измерять напряжение между экраном и сердечником коаксиального кабеля через определенный промежуток времени, получая таким обра-

зом набор данных, представляющих собой значение напряжения, как функцию во времени. Экран коаксиального кабеля соединен с Землей, и его электрический потенциал равен $0B$. ЭМ волны, создаваемые генератором ступенчатых импульсов, запускаются в коаксиальный кабель с падением напряжения между проводником и экраном и составляют всего несколько десятых долей Вольта.

Для проведения диагностики повреждённого кабеля к нему подключается кабельный тестер. Здесь необходимо отметить, что одной из важнейших характеристик тестируемого кабеля является его **волновое сопротивление** (**импеданс кабельной линии**). Оценка данных, полученных кабельным тестером, основывается на следующих основных принципах: любое изменение импеданса в системе «кабельный тестер – тестируемый кабель» вызывает частичное или полное отражение импульса. Поэтому одно отражение будет находиться на интерфейсе «кабельный тестер – вход в тестируемый кабель», в котором диэлектрик изменён, по причине чего импеданс также будет изменён, в то время как второе отражение будет находиться в месте, где изменены электрические свойства тестируемого кабеля. Отраженные импульсы могут находиться или в фазе с падающим импульсом, что происходит в случае, когда ЭМ волны проходят увеличение импеданса, или в противофазе, когда происходит уменьшение импеданса. Осциллограф графически, в виде кривой, отображает на жидкокристаллическом дисплее изменения напряжения во времени, выявленные сэмплером. При необходимости данные в цифровом виде могут быть отправлены непосредственно на ПК и отображены на его дисплее. Кривую, отображённую на дисплее осциллографа или ПК, называют **следом**. Считаем необходимым отметить, что осциллограф позволяет контролировать не только исходный импульс, но и отражения, возникающие от всех неоднородностей линии от её начала до конца. Если кабель исправен и его волновое сопротивление не меняется, то сигнал проходит по кабелю без отражений. Если имеет место обрыв, короткое замыкание или иная неоднородность, то сигнал отражается полностью или частично. Дело в том, что импульсный рефлектометр не отображает изменения сопротивления шлейфа или сопротивление изоляции. Фактически он обнаруживает и визуализирует наличие отражения от неоднородности волнового сопротивления, при этом по характеру отражения можно судить о его природе. Так, локальное увеличение индуктивной составляющей приводит к росту волнового сопротивления в этой точке и возникновению отклика положительной полярности, а увеличение ёмкостной составляющей приводит к уменьшению волнового сопротивления в точке отражения и, соответственно, к образованию отклика отрицательной полярности. В точке, где имеет место обрыв кабеля $(R=\infty)$, коэффициент отражения $K=1$, т.е. имеем полное отражение в виде импульса положительной полярности. В точке короткого замыкания $(G=\infty)$ $K=-1$, т. е. возникает такое же отражение, только в виде импульса противоположенной полярности ($G$ - межпроводная проводимость). Что же касается амплитуд импульсов, то они зависят не только от коэффициента отражения, но и от ослабления исходного импульса в кабеле на длине равной расстоянию от источника импульсов до точки отражения и обратно [4].

**Решение задачи**

Как отмечено в работе [5], если бы кто-то пожелал определить влажность почвы, то он использовал бы коаксиальный кабель аналогично тому, как это происходит при тестировании кабельных линий. Для этого он загрузил бы образец почвы в коаксиальный кабель и направил в него импульс напряжения. Когда импульс достиг бы образца почвы (до точки, от которой начинает располагаться почва, импульс проходит по воздуху), то часть импульса была бы отражена, а остальная часть импульса продолжала бы двигаться дальше. Или, если бы в кабеле имел место обрыв, то в точке обрыва кабеля импульс прекратил бы своё движение и отразился с задержкой или интенсивностью, в зависимости от свойств почвы.

**Диэлькометрический метод измерения влажности почвы**

Конечно же, размещать образец почвы в коаксиальном кабеле для определения влажности почвы нецелесообразно. Поэтому, используя аналогичные принципы с целью определения влажности почвы, нам необходимо в первую очередь иметь оборудование TDR (рис. 6) [5].

Сюда входит генератор импульсов напряжения; пробоотборник, который принимает как входящий, так и отражённый от почвы импульсы; сэмплер - приёмно-передающий прибор, обеспечивающий совместно с устройством синхронизации обработку и передачу на дисплей исходящих от генератора и отражённых импульсов, в том числе и от почвы, в которую внедрён зонд; дисплей, служащий для визуализации и отображения данных, показывающих время прохождения генерируемой кабельным тестером TDR ЭМ волн по проводнику известной длины (зонду), а также величину напряжения в течение всего процесса исследования (необходимо отметить, что коммерческие кабельные тестеры Tektronix 1502 отображают кажущуюся длину, а не время). Кабельный тестер TDR посылает прямоугольные импульсы напряжения в зонд с высокой частотой (в диапазоне гигагерц) и сохраняет на экране их суперпозиции так, что наблюдается единственная «форма», тогда как на самом деле это результат наложения многих форм [5].

**Рисунок 6 –** Блок-схема TDR оборудования для измерения влажности почвы [5]
**Figure 6** - TDR block diagram of soil moisture measurement equipment [5]

Во-вторых, необходимы стержни, называемые **зондом** (рис. 6). TDR зонд для измерения влажности почвы фактически является линией электропередачи, диэлектрической средой для которой служит почва, куда внедрён этот зонд. TDR зонды (датчики) могут иметь различные конфигурации, в зависимости от того, где они будут применены: в лабораторных или в полевых условиях.

Коаксиальный тип зондов используется в лабораторных условиях для исследовательских целей. В полевых условиях ча-

ще всего применяют многостержневые зонды (в основном двух- и трёхстержневые) – это параллельные линии электропередач, которые погружаются в почву на необходимую глубину. Расстояние между стержнями и их геометрия (цилиндрические или из параллельных пластин) могут быть различны. Некоторые классические варианты конструкций зондов представлены на рис. 7.

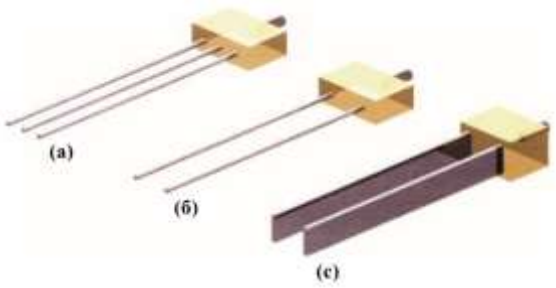



**Рисунок 7 –** Классические варианты конструкций зондов TDR: (a) – трехстержневой зонд; (б) – двухстержневой зонд; (c) – двухстержневой зонд, в котором в качестве стержней используются параллельно расположенные пластины [6]
**Figure 7** - Classic versions of TDR probe design: (a) - three-rod probe; (b) - two-rod probe; (c) - a two-rod probe, in which parallel plates are used as rods [6]

Учитывая то, что метод рефлектометрии во временной области, предназначенный для измерения объёмного содержания воды в почве, весьма чувствителен к конструкции зонда и эффектам, происходящим при его расположении в почве, при проектировании зондов необходимо, чтобы конструкция зонда была прочной и практичной, обеспечивающей в процессе проведения измерений получение достоверных данных о состоянии почвы при минимальном воздействии электропроводности почвы на стержни [6].

Влияние электропроводности почвы на измерения рефлектометром зависят от геометрических параметров стержней зонда. При этом обнаружено, что в основном затухания происходят при использовании зондов с длинными, близко расположенными стержнями. В связи с этим необходимо учитывать следующие факторы:

а) увеличенное расстояние между стержнями обеспечит лёгкость введения зонда в почву, появится возможность увеличить жёсткость стержней за счёт увеличения площади их поперечного сечения, однако это может привести к тому, что вокруг поверхностей стержней почва будет изменять свою структуру (становиться более плотной), и поэтому простое вдавливание зонда в почву повлечет за собой значительное снижение измеренного содержания воды по сравнению с ненарушенными участками почвы;

б) для зондов с короткими стержнями сжатие вокруг них будет минимальным, что указывает на более благоприятную взаимосвязь между объемом выборки и компрессией [6].

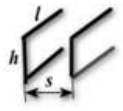
Авторами исследования [7] было показано, что эффект сжатия почвы вокруг стержней может быть сведен к минимуму, если применить бур или какое-либо другое устройство для удаления почвы в точках, где будет установлен зонд. Как отмечено в [6], факторы «а» и «б» не являются взаимодополняющими, и поэтому в процессе проектирования и изготовления зондов могут быть допущены некоторые компромиссы. Для справки: электропроводность почвы показывает, насколько хорошо почва способна проводить электрический ток. Мелкие заряженные частицы, присутствующие в почве, называемые ионами, помогают переносить электрический заряд через вещество. Эти ионы могут быть заряжены поло-

жительно или отрицательно. Чем больше ионов, тем выше проводимость; меньшее количество ионов приведет к снижению проводимости. Электропроводность обычно измеряется в миллисименсах на сантиметр.

Таким образом, можно заключить, что влияние электропроводности на измерения TDR методом зависит от геометрических параметров стержней зонда, а именно, от **константы зонда**. Следует отметить, что **константа зонда** – это, по существу, **геометрический коэффициент** $g(м)$, значения для которого в приближении могут быть аппроксимированы с учётом базовой геометрии стержня – его длины $l$. Эта аппроксимация основана на таких принципах, как *две бесконечные параллельные пластины, два бесконечных параллельных стержня и бесконечная коаксиальная линия* [6].

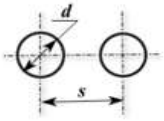
Как отмечено в [6], наибольшая погрешность между измеренными геометрическими параметрами и рассчитанными константами зонда возникает при работе с параллельными пластинами, так как краевой эффект является существенным, если учитывать, что рассматриваемые пластины имеют конечные размеры. Для бесконечно длинных пластин, когда $l \to \infty$ и $h/s \to \infty$, уравнение (1) является точным, а для случая, когда $h/s \to 0$, *R.P. Feynman* в соавторстве [8] для геометрического коэффициента $g$ предложили аппроксимацию, согласно которой желательно принять площадь пластины зонда, которая получилась бы, если бы пластины были искусственно расставлены на расстояние, равное 3/8 от расстояния между пластинами.

- *Бесконечные параллельные пластины (м):*



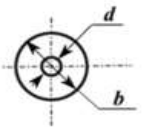

$$g = \frac{lh}{s} \tag{1}$$

- *Двухстержневые (м):*




$$g = \frac{12{,}1l}{\ln\left(\frac{s}{d} + \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}\right)} \tag{2}$$

- *Коаксиальная линия (м):*




$$g = \frac{2\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{b}{d}\right)} \tag{3}$$

Здесь необходимо отметить, что все три уравнения (1)-(3) не могут быть использованы для расчёта геометрических коэффициентов, т. к. параметры зондов (и двухстержневого, и коаксиального) не предполагают конечных эффектов, но они, конечно же, существуют для зондов TDR и могут быть использованы для более коротких стержней [6]. Эти уравнения не должны применяться для расчётов геометрических коэффициентов, но, тем не менее, могут быть весьма полезны при проведении анализа геометрических коэффициентов.

Важным следствием описанного метода по определению параметров TDR зондов является то, что исследователь, анализируя принятые параметры стержней, может увидеть эффект от увеличения или уменьшения длины стержней или расстояния между ними. Так, уменьшение длины стержней приводит к уменьшению геометрического коэффициента $g$, делая стержни менее восприимчивыми к помехам на электропроводность. Наряду с этим уменьшение длины стержней сокращает время прохождения ЭМ сигнала, что, в свою очередь, снижает точность измерения диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

*D.A. Robinson* в соавторстве отмечают, что для проведения качественных измерений в полевых условиях, с целью обеспечения компромисса между временем прохождения ЭМ сигнала, точностью измерения диэлектрической проницаемости и электропроводностью, а также с целью создания удобства для введения стержней зонда в почву предлагается применять в основном зонды с длиной стержней от 0,15 до 0,30 м. Согласно информации, изложенной в работе [5], *M.B. Kirkham* отмечал: *«…обычно, на практике, применяют зонды с длиной стержней от 100 мм до 1 м. Самая короткая глубина, которую я встречал в публикациях, составляла 50 мм. Зонды со стержнями длиной менее 50 мм не дают хороших следов».*

Не менее интересным является эффект расстояния между стержнями: так, чем дальше друг от друга расположены стержни, тем меньше становится геометрический фактор. При этом увеличение расстояния между стержнями приведёт к тому, что при погружении зонда в почву почва вокруг поверхностей стержней, уплотняясь, будет изменять свою структуру, влияя тем самым на измерение её диэлектрической проницаемости.

Приведённый анализ показал, что то, что благотворно влияет на снижение воздействия на электропроводность, является вредным для измерения содержания воды в почве.

Что касается длины стержней зонда, необходимо принять к сведению, что зонды длиной менее 0,1 м не обеспечивают возможность получения хороших следов. Зонды длиной более 0,3 м при введении в почву могут сильно изгибаться, отклоняясь от вертикали, при этом внедрение их на большую глубину требуют применения больших физических усилий.

*Работая с короткими зондами* (за исключением самых твёрдых почв), исследователь, погружая их в почву вручную, проводит необходимые измерения и переходит к следующему участку. Получив большое количество результатов, исследователь может быстро оценить изменчивость влажности почвы на исследуемом участке. При использовании более длинных зондов (до 1 м), чаще всего с помощью специальных технологических устройств, приходится подготавливать для них скважину. После установки длинных зондов скважина заполняется почвой и уплотняется (притоптывается), чтобы избежать образования воздушных промежутков между почвой и поверхностью стержней. Иногда, после того как более длинные зонды установлены и с их помощью проведены необходимые измерения, зонды не извлекают, оставляя их на месте для повторных измерений с установленными на коаксиальном разъёме колпачками [5].

*Если зонды двухстержневые,* то необходимо использовать **балун** (рис. 8), который является согласующим трансформатором импеданса (сопротивления) между TDR тестером и зондом. Объясняется это тем, что для обвязки компонентов внутри кабельного TDR тестера и на выходе из него используется коаксиальный кабель с характеристическим сопротивлением $Z = 50\,Ом$. Поэтому для получения «сбалансированной линии» между кабельным тестером и зондом коаксиальный кабель TDR тестера подключают к балуну и через него, используя экранированный телевизионный кабель $Z = 185 Ом$, подключаются к зонду [5].

**Рисунок 8 –** Основные компоненты, применяемые для определения влажности почвы TDR методом с помощью двухстержневого зонда [10]
**Figure 8** - Main components used to determine soil moisture TDR by two-rod probe [10]

*Если используются трёхстержневые зонды,* то, благодаря тому, что они самостоятельно моделируют коаксиальную линию, отпадает необходимость применения балуна [5].

Что касается определения содержания влаги в почве, то оно основано на уникальных свойствах молекулы воды. Дело в том, что диэлектрическая проницаемость воды при $20°C$, равна приблизительно 80,4, в то время как большинство сухих твёрдых компонентов почвы имеют диэлектрические постоянные в диапазоне 2 – 7, а у воздуха диэлектрическая постоянная фактически равна 1 ($\varepsilon_{возд.} = 1,00059$) [5]. Учитывая такое большое отличие между показателями диэлектрической проницаемости воды, сухих компонентов почвы и воздуха, становится ясным, что диэлектрическая проницаемость почвы является весьма хорошим показателем для измерения объёмного содержания воды в почве.

Следует отметить, что почва, расположенная между стержнями зонда и вокруг них, является диэлектриком, окружающим линию электропередачи (стержни зонда), т. е. фактически является волноводом [3]. Именно этот факт и позволяет применить кабельный тестер для вычисления объёмной диэлектрической проницаемости почвы (термины диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость являются синонимами).

Учитывая изложенное, для реализации измерительного процесса по определению влажности почвы с помощью рефлектометрии во временной области, подключают TDR модуль к зонду, расположенному в почве, при этом генератор ступенчатых импульсов запускает по коаксиальному кабелю непосредственно в TDR зонд ЭМ волны в диапазоне частот $1 МГц - 1 ГГц$ [5]. Как только этот сигнал достигает начала зонда, из-за несоответствия импеданса между кабелем и почвенным зондом часть сигнала, отражаясь, возвращается обратно в TDR устройство. Оставшаяся часть сигнала доходит до конца зонда, после чего происходит ещё одно отражение сигнала. Эти два

отражения приводят к двум разрывам в результирующем сигнале, которые обнаруживаются сэмплером и отображаются на дисплее рефлектометра и, при необходимости, на экране ПК. Разница во времени между этими двумя разрывами представляет собой время $t$, которое необходимо импульсу для прохождения пути в два раза превышающему длину зонда $l$, расположенного в почве. Здесь необходимо отметить, что доля импульса, рассеиваемая в почве, связана с её электропроводностью, а время прохождения импульса вдоль зонда зависит от содержания влаги в почве.

На основании анализа времени прохождения ЭМ волны вдоль всей длины зонда можно рассчитать объемную относительную диэлектрическую проницаемость почвы $\varepsilon$, по результатам которой определить объемное содержание в ней влаги $\theta$.

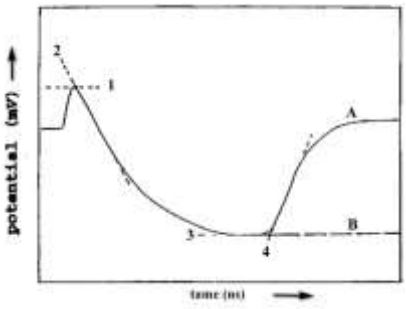



**Рисунок 9 –** След формы ЭМ волны с экрана TDR тестера с касательными к кривой, построенной для определения расстояния, пройденного импульсами, исходящими от генератора и отражёнными, в том числе и от почвы, в которую внедрён зонд [2]
**Figure 9** - Trace of the EM wave shape from the tester TDR screen with tangents to the curve built to determine the distance traveled by pulses emanating from the generator and reflected, including from the soil into which the probe is embedded [2]

Для выполнения необходимых расчётов следует иметь информацию, полученную в процессе проведения TDR измерения, состоящую из выходной кривой (след формы ЭМ волны TDR), изображённой на экране осциллографа TDR тестера или ПК. След формы ЭМ волны (рис. 9) может быть проанализирован непосредственно с экрана TDR тестера, или с распечатанного и сохранённого для последующего анализа документа, или с использованием соответствующей информации, хранящейся в ПК [1]. Точки отражения определяются с помощью касательных, прорисованных к кривой (рис. 9), в т. ч. в точке 1 – в точке пересечения касательных к кривой с горизонтальной линией, характеризующей максимальное отражение; в точке 2 – в точке перегиба кривой, следующей за максимумом; в точке 3 – в точке пересечения горизонтальной линии с точкой отражения минимума; в точке 4 – в точке перегиба кривой, следующей после минимума. Пересечение точек 1 и 2 идентифицирует отражение, происходящее перед входом ЭМ волны в зонд (начальное отражение), а пересечение в точках 3 и 4 идентифицирует отражение волны от конца зонда (конечное отражение). Расстояние между точками 1 и 4 определяется по шкале, изображённой на экране осциллографа TDR-тестера.

Для каждого измерения кабельный тестер TDR 1502B или1502C можно «обнулить» при визуализации начального отражения, происшедшего перед входом ЭМ волны в зонд, после чего переместить циферблат в положение, когда волна отразится от конца зонда, что обеспечит прямое считывание с экрана осциллографа расстояния, пройденного импульсом.

На отображение сигнала также влияет настройка на кабельном тестере параметра $V_p$, устанавливаемого на приборе перед началом проведения измерений ($V_p$ - постоянная скорости распространения им-

пульса, зависящая от типа кабеля, используемого в процессе проведения измерения; $V_p$ выбирается оператором из перечня, указанного на панели кабельного тестера). Для $50\,Ом$ кабелей $V_p = 0,66$. Это значение должно быть включено в формулу при расчете времени пробега импульсом за весь путь, считанный с экрана осциллографа. Для определения диэлектрической проницаемости выполняют определенные расчёты [1].

Время в пути рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{L_s}{V_p \cdot c} \qquad (4)$$

здесь $t$ - время пробега ЭМ волны за весь путь ($s$); $L_s$ - расстояние, пройденное импульсом, считанное с экрана кабельного тестера ($м$); $V_p$ - постоянная скорости распространения импульса, зависящая от типа кабеля, используемого в процессе проведения измерения, выбирается оператором из перечня, указанного на панели кабельного тестера; $c$ - скорость света в свободном пространстве ($c = 3 \cdot 10^8\ м/с$).

Скорость распространения импульса вычисляется по формуле:

$$V_s = \frac{L_p}{t} \qquad (5)$$

здесь $V_s$ - скорость распространения импульса ($м/с$); $L_p$ - длина стержней зонда, введённого в почву ($м$).

Диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{V_s}\right)^2 \qquad (6)$$

или

$$\varepsilon = \left(\frac{ct}{L_p}\right)^2 \frac{n!}{r!(n-r)!} \qquad (7)$$

Как отмечено в работе [1], для оригинального кабельного тестера Tektronix 1502 не был предусмотрен $V_p$ для оператора в качестве опции, и поэтому при проведении расчётов исследователи принимали $V_p = 1$. В этой же работе отмечено, что авторами работы [9] для определения $\varepsilon$ была применена формула: $\varepsilon = \left(\frac{ct}{2L_p}\right)^2$, а $t$ задаётся как $t = \frac{2L_s}{V_p \cdot c}$. В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [10], в случае, когда $V_p = 0,66$, расчет должен быть выполнен, как предлагалось выше, с использованием $L_p$, а не $2L_p$.

В 1980 году, исследуя четыре типа минеральных почв с различной текстурой, от песчаного суглинка до глины (табл. 1), *G. Topp - J. Davis - A. Annan* [11] предположили, что для большого количества разнообразных почв и почв подобных материалов существует уникальная связь между кажущейся относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$ и объёмным содержанием воды $\theta$, «*которая не зависит от типа почвы, плотности почвы, температуры почвы и содержания растворимой соли».*

На основании проведённых экспериментов *G. Topp* в соавторстве [11] предложил эмпирическое калибровочное уравнение, выражающее зависимость между диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$ и объемным содержанием воды $\theta$, которое, по их мнению, может быть применено для большинства типов почв:

**Таблица 1 –** Тип почвы, гранулометрический состав и процентное содержание органического материала в четырех минеральных почвах, исследованных G. Topp в соавторстве [11]
**Table 1** - Soil type, grain size distribution and percentage of organic material in four mineral soils, co-authored by G. Topp [11]

| Soil type, depth in centimeters | Percentage of clay, <0.002 mm | Percentage of silt, 0.002-0.05 mm | Percentage of sand, 0.05-2.0 mm | Percentage of organicmaterial | Textural class |
|---|---|---|---|---|---|
| Rubicon (0-20 cm) | 9 | 26 | 65 | 3 | sandy loam |
| Bainsville (0-20 cm) | 34 | 36 | 30 | 6 | clay loam |
| Bainsville (40-50 cm) | 36 | 42 | 22 | 1 | clay loam |
| Bainsville (90-110 cm) | 66 | 31 | 3 | 0 | heavy clay |

(soil type, depth in centimeters – тип почвы, глубина в см; percentage of clay – процентное содержание глины; percentage of silt – процентное содержание ила; percentage of sand – процентное содержание песка; percentage of organic material – процентное содержание органического материала; textural class - текстурный класс; sandy loam – супесь; clay loam – суглинок; heavy clay – тяжёлая глина)

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3$$

или

$$\theta = -5,3\cdot10^{-2} + 2,92\cdot10^{-2}\varepsilon - 5,5\cdot10^{-4}\varepsilon^2 + \\ +4,3\cdot10^{-6}\varepsilon^3 \quad (8)$$

Здесь необходимо отметить, что анализ эмпирического калибровочного уравнения (5), выполненный другими исследователями, показал как положительные [12], так и отрицательные [13] результаты, свидетельствующие о том, что не для всех типов почв может быть использовано это уравнение.

Авторы работы [13] отмечали: «Наша цель состояла в том, чтобы получить единую зависимость, пригодную для калибровки, включающую только свойства почвы или параметры, которые общеизвестны или могут быть легко оценены с достаточной точностью. Более ранние попытки моделирования соотношения $\varepsilon(\theta)$ предполагали наличие четырехкомпонентных систем твердой фазы, воздуха, свободной воды и связанной воды, в которых связанная вода имеет меньшее значение $\varepsilon$, чем свободная вода из-за ее близости к активным коллоидным поверхностям».

Для подобных моделей смешивания имеются два основных подхода: **теоретическая (Maxwell De Loor) и эмпирическая модели смешивания** для четырёх компонентов: твердой фазы ($S$), плотно связанной воды ($bw$), свободной воды и воздуха.

**1. Теоретическая модель**, основанная на уравнении Maxwell De Loor описывает однородную смесь одного или нескольких веществ случайно распределенных в среде с различной $\varepsilon$ [14, 15]. Основное уравнение этой модели было переписано *M.C. Dobson* в соавторстве [16] для четырехкомпонентной системы с пластинчатыми частицами почвы в качестве основной среды. Это уравнение имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{3\varepsilon_s + 2(\theta-\theta_{bw})(\varepsilon_{fw}-\varepsilon_s) + 2\theta_{bw}(\varepsilon_{bw}-\varepsilon_s) + 2(\phi-\theta)(\varepsilon_a-\varepsilon_s)}{3 + (\theta-\theta_{bw})(\varepsilon_s/\varepsilon_{fw}-1) + \theta_{bw}(\varepsilon_s/\varepsilon_{bw}-1) + (\phi-\theta)(\varepsilon_s/\varepsilon_a-1)} \quad (9)$$

здесь $\phi$ - пористость, а индексы $bw$, $fw$, $a$ и $s$, соответственно, относятся к связанной воде, свободной воде, воздуху и твердой фазе.

**2. Эмпирическая модель,** предложенная *J.R. Birchak* в соавторстве [17], имеет вид:

$$\varepsilon^{\alpha} = (1-\phi)\cdot\varepsilon_s^{\alpha} + (\phi-\theta)\cdot\varepsilon_a^{\alpha} + (\theta-\theta_{bw})\cdot\varepsilon_{fw}^{\alpha} + \theta_{bw}\cdot\varepsilon_{bw}^{\alpha} \quad (10)$$

В этом уравнении параметр подгонки кривой $\alpha$ можно интерпретировать как меру геометрии среды по отношению к приложенному электрическому полю. Для двухфазных систем (электрическое поле параллельно слоистому слою почвы, электрическое поле перпендикулярно слоистому слою почвы), *K. Roth* в соавторстве [18] показали, что значение $\alpha$ находится в диапазоне $-1 < \alpha < +1$. Предполагая трёхфазную систему (без связанной воды) для различных почв, эти авторы установили среднее значение для $\alpha$, равное $\alpha = 0,50$. Для четырёхфазных систем *M.C. Dobson* в соавторстве [16] установили, что среднее значение $\alpha = 0,65$.

Анализ эмпирической модели (уравнение (10)), проведённый авторами [13], показал, что, поскольку значение не известно и должно быть подобрано, модель не имеет преимуществ перед моделью Maxwell De Loor и поэтому не рассматривается.

Что касается теоретической модели, основанной на уравнении Maxwell De Loor, то необходимо отметить, что теоретическая модель (9) содержит только физические параметры, без дополнительных параметров подгонки.

Для подтверждения своих выводов исследователями было выполнено сравнение калибровочного уравнения (8) с теоретической моделью Maxwell De Loor (9).

С этой целью авторами [13] была проделана следующая работа.

Диэлектрическая проницаемость содержания воды измерялась гравиметрическим и TDR методами на упакованных колонках для 11 типов почв. C. Dirksen и S. Dasberg [13] сообщали: «…В нашей лаборатории были доступны четыре голландские почвы: Лесс Groesbeek (Типичный Hapludalf), Донная супесь долины Wichmond (Типичный Haplaquent), Речной илистый суглинок Munnikenland (Типичный Haplaquept) и морская илистая глина Y-Polder (Типичный Haplaquept). Четыре глинистые почвы нами были получены от Международного справочно-информационного центра почвы (ISRIC) в Wageningen: A и B горизонты Бразильских гуминовых Ferralsol (Типичный Acrortox), французская Средиземноморская красная почва (Типичный Rhodoxeralf) и кенийский pellic Vertisol (Типичный Pellustert).

Три чистых глинистых минерала были получены от кафедры почвоведения и питания растений Вагенингенского сельскохозяйственного университета: bentonite (smectite, from Osage, WY), illite (Grundite Co.) и attapulgite (источник неизвестен). Attapulgite, также называемый palygor skite, представляет собой глинистый минерал с высокой водопоглощающей способностью, редко встречающийся в почвах с волокнистой морфологией».

Измеренные *C. Dirksen и S. Dasberg* в процессе проведения исследований параметры почв и объемная доля мономолекулярного слоя прочно связанной воды приведены в таблице 2.

В числе исследованных рассматривались почвы от лёсса до чистого бентонита.

**Таблица 2 –** Измеренные параметры почв и объемная доля мономолекулярного слоя прочно связанной воды [13]
**Table 2 -** Measured soil parameters and volume fraction of monomolecular layer of strongly bound water [13]

| Soil or pure mineral | Bulk density + $(\rho_b)$ $g \cdot cm^{-3}$ | Specific surface (S) $m^2 \cdot g^{-1}$ | Bound water ** $(\theta_{bw})$ | Hygrosco-pic water $cm^3 \cdot cm^{-3}$ | Wilting point § |
|---|---|---|---|---|---|
| Groesbeek | 1,49 | 25 | 0,011 | 0,017 | 0,077 |
| Wichmond | 1,36 | 41 | 0,017 | 0,022 | 0,120 |
| Ferralsol-A | 1,14 | 61 | 0,021 | 0,025 | 0,260 |
| Ferralsol-B | 1,13 | 61 | 0,021 | 0,028 | 0,245 |
| Munniken-land | 1,13 | 79 | 0,027 | 0,035 | 0,177 |
| Mediter-ranean | 1,38 | 93 | 0,039 | 0,043 | 0,185 |
| Y-Polder | 1,08 | 107 | 0,035 | 0,040 | 0,200 |
| Illite | 1,30 | 147 | 0,057 | 0,050 | 0,290 |
| Attapulgite | 0,55 | 270 | 0,045 | 0,039 | 0,320 |
| Vertisol | 0,92 | 428 | 0,118 | 0,118 | 0,375 |
| Bentonite | 0,94 | 665 | 0,187 | 0,114 | - |

+ среднее количество цилиндрических сосудов (насадочных колонок); ****** мономолекулярный слой, $\theta_{bw} = \delta \cdot \rho_b \cdot S$ ; **§** усилие прижимной пластины, 1,5 МПа. (soil or pure mineral – почва или чистый минерал; bulk density – объёмная плотность; specific surface – удельная поверхность; bound water – связанная вода; hygroscopic water – гигроскопическая вода; wilting point – точка увядания).

**Таблица 3 –** Состав почв, использованных в данном исследовании [13]
**Table 3** - Composition of soils used in this study [13]

| Soil | Clay | Silt | Sand | Organic matter | Clay minerals |
|---|---|---|---|---|---|
| Groesbeek | 10 | 70 | 20 | 0,95 | |
| Wichmond | 14 | 31 | 55 | 4,3 | smectite vermiculite |
| Ferralsol-A | 63 | 26 | 11 | 0 | gibbsite + kaolinite |
| Ferralsol-B | 57 | 33 | 10 | 0 | gibbsite + kaolinite |
| Munniken-land | 40 | 56 | 3 | 5,0 | illite + kaolinite |
| Mediterra-nean | 40 | 34 | 27 | 0,4 | illite + kaolinite |
| Y-Polder | 45 | 42 | 13 | 4,6 | illite + kaolinite |
| Vertisol | 86 | 10 | 4 | 1,4 | smectite |

(soil - почва; clay – глина; silt – ил; sand – песок; organic matter –органическое вещество; clay minerals глинистые минералы)

Измеренные удельные поверхности $(S)$ исследованных типов почв составляли от $25 \, до \, 665 \, м^2/г$, а насыпная плотность $\rho_b$ - от $0,55 \, до \, 1,49 \, г/см^3$.

Для справки:
- лёсс (нем. *löss*) - осадочная горная порода, неслоистая, однородная известковистая, суглинисто-супесчаная, имеет светло-жёлтый или палевый цвет;
- бентонит назван по месторождению Бентон, (США) – природный глинистый минерал, гидроалюмосиликат, обладает свойством разбухать при гидратации в 14-16 раз. Бентонит является биологически активным веществом.

Содержание глины, ила, песка и органического материала, а также основные типы глинистых материалов, определённые методом рентгеновской дифракции, приведены в таблице 3.

Все измерения повторялись дважды. Воздушно-сухой почвенный материал (при необходимости предварительно просеянный сквозь сито с ячейками до 2 мм) по-

этапно доводился до желаемой влажности с помощью устройства, включающего в себя распылитель воды. Каждый раз после тщательного перемешивания почвы и воды, при получении смеси с определённой влажностью, два предварительно взвешенных акриловых цилиндрических сосуда (диаметр сосуда - 50 мм, высота 125 мм) упаковывались до насыпной плотности таким образом, чтобы в каждом из них почва, по возможности, располагалась равномерно распределённой по всему объёму. Затем подготовленные образцы взвешивали и вычисляли соотношение массы почвы к объему.

На следующем этапе, используя подготовленные образцы, проводили измерения влажности почв TDR методом. TDR измерения выполнялись с помощью кабельного тестера TDR (модель1502B) с первичным диапазоном частот от $10\,МГц$ до $1\,ГГц$. Для всех измерений влажности почв использовался один и тот же трёхстержневой зонд (длина – 100 мм, диаметр стержней – 2 мм, расстояние между стержнями – 10 мм), напрямую подключённый к кабельному тестеру посредством коаксиального кабеля длиной 3,5 м, с характеристическим сопротивлением 50 *Ом*. Форма сигнала, полученная в процессе проведения измерений с помощью кабельного тестера, передавалась и сохранялась на *IBM*, совместимом с ПК для последующего извлечения и анализа в соответствии с программой [19]. После выполненных TDR измерений грунт удаляли из акриловых цилиндрических сосудов, отбирая при этом пробы для гравиметрического определения содержания в них воды, по результатам которых рассчитывали объемное содержание воды $\theta$, на основе средней насыпной плотности упакованных цилиндров $\rho_b$. Эти измерения повторялись 8-12 раз для каждой почвы, что позволяло измерить $\theta$ с точностью от 0,02 до 0,03 $см^3 \cdot см^{-3}$.

**Заключение**

Проведённые в процессе исследований измерения показали, что эмпирическое калибровочное уравнение (8), выведенное G. Topp в соавторстве, оказалось точным только для четырёх типов почв, у которых $\rho_b > 1,30\,г/см^3$, включая иллит ($S = 147\,м^2/г$). Что касается почв, у которых $\rho_b < 1,30\,г/см^3$, то для них справедлива теоретическая модель, основанная на уравнении Maxwell De Loor, описывающая однородную смесь одного или нескольких веществ, распределенных случайным образом в среде с различными $\varepsilon$. Уравнение Maxwell De Loor (9) показало точность для семи типов почв, у которых $\rho_b < 1,30\,г/см^3$, включая аттапульгит ($\rho_b = 0,55\,г/см^3$, $S = 270\,м^2/г$), предполагая наличие мономолекулярного плотно связанного слоя воды (толщина слоя $\rho_b = 0,55\,г/см^3$, $S = 270\,м^2/г$, $\varepsilon_{bw} = 3,2$ и $\varepsilon_s = 5,0$). Точность, полученная для семи типов почв с помощью уравнения Maxwell De Loor (9), оказалась аналогичной точности, полученной G. Topp в соавторстве. Кривая $\varepsilon(\theta)$ для этих почв имела такую же форму, как и для почв, исследованных G. Topp в соавторстве. Объясняется это тем, что отклонения от результатов, полученных G. Topp в соавторстве с помощью уравнения (8), как правило, происходят в большей степени по причине более низкой насыпной плотности $\rho_b$ и, соответственно, более высокой объёмной доли воздуха при

том же $\theta$, связанном с мелкотекстурированной почвой по сравнению с плотно связанной водой с низким $\varepsilon_s$. Оба эти эффекта, а также очевидное аномальное поведение, такое как снижение эффективности диэлектрической проницаемости $\varepsilon$ с увеличением $\varepsilon_s$ могут быть учтены уравнением Maxwell De Loor (9), что делает уравнение лучше уравнения (8). Здесь необходимо отметить, что эмпирическая $\alpha$ модель чувствительна к непредсказуемому значению $\alpha$ и не может учитывать аномальные значения. Как отмечали C. Dirksen и S. Dasberg, при исследовании отдельных типов почв может потребоваться проведение калибровки и решение о возможности использования эмпирической зависимости (8) к конкретному типу почвы, и каждый исследователь должен будет принимать решение самостоятельно.

## REFERENCES

1. **Slik P.C.** Time Domain Reflectometry for measuring bulk soil electrical conductivity and comparison with the EM38 instrument // RAPPORT 35. Vakgroep Waterhuishouding Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen. 65p. 1993 *(in English)*

2. **Nissen H.H., Moldruf P.** Theoretical background for the TDR methodology // Proc. of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science, 16 September 1994, Tjele, Denmark. SP Report, vol. 3, no. 11, p.9-23, 1995 *(in English)*

3. **Lorrain P., Corson D.R.** Electromagnetism: principles and applications // W. H. Freeman and Company. San Francisco.1979. P. 508 *(in English)*

4. **Mitrofanov S.V., Pozdnyakov N.V.** Metodika opredeleniya povrezhdenij kabelnyh linij *(in English)*

//http:www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya

5. **Kirkham M.B.** Principles of soil and plant water relations // Academic Press is an imprint of Elsevier. Second edition 2014. P. 599 *(in English)*

6. **Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., and Friedman S.P.** A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone J., vol. 2, pp 444–475, 2003 *(in English)*

7. **Rothe A., Weis W., Kreutzer K., Matthies D., Hess U., Ansorge B.** Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture // Water Resour. Res., vol. 33, iss. 7, pp 1585-1593, 1997 *(in English)*

8. **Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.** The Feynman lectures on physics. Mainly electromagnetism and matter. Vol. ll. P. 566. Published by Addison-Wesley, Reading 2010 *(in English)*

9. **Dasberg S., Dalton F.N.** Time Domain Reflectometry Field Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity // Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 49, iss. 2, pp 293-297, 1985 *(in English)*

10. **Bonnell R.B., Broughton R.S. and Enright P.** The measurement of soil moisture and bulk soil salinity using time domain reflectometry // Canadian Agricultural Engineering, vol. 33, pp 225-229, 1991 *(in English)*

11. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.** Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // Water Resour. Res., vol. 16, iss. 3, pp 574-582, 1980 *(in English)*

12. **Drungil C.E.C., Gish T.J., Abt K.** Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry // Am. Soc. of Agricul. Engineers, vol. 32, iss. 1, pp 177-180, 1989 *(in English)*

13. **Dirksen C., Dasberg S.** Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements // Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 57, iss. 3, pp 660-667, 1993 *(in English)*

14. De Loor **G.P.** Dielectric properties of heterogeneous mixtures // Appl. Sci. Res., B3, pp 479–482, 1964 *(in English)*

15. **De Loor G.P.**, 1990. The dielectric properties of wet soils. BCRS (Netherlands Remote Sensing Board) Report no. 90-13. TNO Physics and Electronics Laboratory, the Hague, the Netherlands *(in English)*

16. **Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., Elrayes M.A.** Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-23, no. 1, pp 35-46, 1985 *(in English)*

17. **Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., and Victor J.M.** High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE, vol. 62, iss. 1, pp 93-98, 1974 *(in English)*

18. **Roth K., Schulin R., Flühler H., Attinger W.** Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach // Water Resour. Res., vol. 26, iss. 10, pp 2267-2273, 1990 *(in English)*

19. **Heimovaara T.J., Bouten W.** A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents // Water Resour. Res., vol. 26, iss. 10, pp 2311-2316, 1990 *(in English)*

---

*К.А. Аскеров, А.В. Мардахаев, А.Ш. Хидиров выражают благодарность Фонду Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики за финансовую поддержку (Грант № EIF -MQM-ETS-2020-1(35)-08/04/1-M-04*

# The Use of Typomorphic Features of Native Gold for the Solution of Geological Exploration

## G.S. Guseinov, I.A. Mammedov

*Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlıg ave. 20, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**
Huseynov Gamed / e-mail: gamedhuseynovv@mail.ru

**Abstract**

The article examines the typomorphic features of native gold in different types of ores of the described region, which make it possible to address issues directly related to the practice of geological exploration. So, the established elements-impurities included in the composition of gold make it possible to use it as additional information when specifying the conditions for the formation of deposits, and the identification of the internal structure allows the depth of deposition, the stages of ore formation. The complex use of typomorphic features of native gold makes it possible to evaluate the processing of ores, which is of great practical importance in the industrial development of deposits.

**Keywords :** native gold, impurity elements, typomorphic features, internal structure.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_123_130

***Accepted*** *17.12.2021*
***Received*** *21.09.2022*
***Revised*** *23.09.2022*

**For citation:**
*Guseinov G.S., Mammedov I.A.*
[The use of typomorphic features of native gold for the solution of geological exploration]
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 123-130 (*in Russian)*

# Geoloji kəşfiyyat işlərinin həlli üçün sərbəst qızılın tipomorf xüsusiyyətlərinin istifadəsi

## Q.S. Hüseynov, İ.Ə. Məmmədov

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ 1010, Azərbaycan)*

**Yazışma üçün:**
Hüseynov Qamed / e-mail: gamedhuseynovv@mail.ru

**Xülasə**

Məqalədə qeyd edilən regionda müxtəlif tip filizlərdə sərbəst qızılın tipomorf xüsusiyyətlərinin geoloji kəşfiyyat işlərinin həlli ilə bilavasitə əlaqədar olan məsələlərin həlli üçün istifadəsinin praktiki əhəmiyyətinə baxılır. Sərbəst qızılın daxilində mövcud olan element-qarışıqlar yataqların əmələgəlmə şəraitinin dəqiqləşdirilməsi zamanı əlavə informasiyanın alınmasında, aşkar olunmuş daxili quruluşu filiz kütləsinin yerləşmə dərinliyini, filizəmələgəlmənin mərhələ və etapının öyrənilməsinə imkan verir. Sərbəst qızılın tipomorf xüsusiyyətlərinin kompleks istifadəsi yataqların sənaye mənimsənilməsi zamanı filizin işlənilməsi və qiymətləndirilməsində mühüm praktiki əhəmiyyət kəsb edir.

**Açar sözlər:** sərbəst qızıl, qatışıq elementlər, tipomorfik əlamətlər, daxili quruluş.

**DOI:** 10.52171/2076-0515_2022_14_03_123_130

**УДК:** 553.441

# Использование типоморфных особенностей самородного золота для решения геологоразведочных работ

## Г.С. Гусейнов, И.А. Мамедов

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 20, AZ1010, Баку, Азербайджан.)*

**Для переписки:**
Гусейнов Гамед / e-mail: mansursahlarli1994@gmail.com

**Аннотация**

В статье рассмотрены типоморфные особенности самородного золота в разных типах руд Лок-Карабахской структурно-формационной зоны Малого Кавказа, которые применимы при решении вопросов, связанных непосредственно с практикой геологоразведочных работ. Так, установленные элементы-примеси, входящие в состав золота, дают возможность использовать эту дополнительную информацию при уточнении условий формирования месторождений, а выявление внутреннего строения позволяет выяснить глубины отложения, стадийность и этапность рудообразования. Комплексное использование типоморфных признаков самородного золота позволяет оценить переработку руд, что имеет большое практическое значение в промышленном освоении месторождений.

**Ключевые слова:** самородное золото, элементы-примеси, типоморфные признаки, внутреннее строение.

**Введение**

Одним из актуальных вопросов современной геологической науки является типоморфизм самородного золота, на которое долгое время не было обращено достаточное внимание. Причины этого – сложности и трудности исследований в этом направлении, вероятно, были ограничены применимостью традиционных методов исследования, в также отсутствие специальных методик, которые обусловили относительно медленное развитие работ рассматриваемого профиля.

Впоследствии в связи с развитием научных исследований *Н.В. Петровской, А.А. Николаевой, А.И. Гинзвург, Р.П. Бадаловой, М.И. Новгородской, С.В. Яблоковой* и многих других в этом направлении достигнут большой прогресс.

Изучение типоморфизма самородного золота является одним из важнейших аспектов учения о месторождениях полезных ископаемых, значение которого исключительно велико при проведении детальных геологоразведочных работ и оценки прогнозных ресурсов рудных месторождений. При металлогеничных исследованиях и прогнозно-поисковых работах большое значение имеет выявление рудно-формационных месторождений, от правильного установления которых во многом зависит от эффективности геологоразведочных работ. Решение этой задачи в немалой мере способствует результату изучения типоморфного золота [5].

Известно, что всестороннее изучение типоморфных признаков самородного золота позволяет получить максимальную информацию об условиях образования золоторудных и золотосодержащих месторождений, их местоположений, уровень эрозионного среза оруденения и металлогении регионов с целью разработки новых критериев поисков и оценки месторождений, а также дает возможность для определения направления геолого-разведочных работ.

Учитывая вышеизложенное, нами уделено особое внимание изучению типоморфных особенностей самородного золота, являющегося не только объектом промышленного интереса, но и минерал-индикатором. Оно по ряду своих типоморфных свойств (крупность выделений, золотоносные ассоциации, морфологии, пробность, элементы-примеси, внутреннее строение) обладает гораздо более широким диапазоном колебаний по сравнению с другими минералами золоторудных и золотосодержащих колчеданных месторождений. Колебания этих, разумеется, не случайно: они обусловлены физико-химическими условиями рудоотложения [4].

**Цель работы**

Объектом исследований выбрана Лок-Карабахская структурно-формационная зона (СФЗ) Малого Кавказа, где известен ряд месторождений колчеданных формаций.

В основу работы положены материалы, собранные и отображенные автором при проведении научно-исследовательской работы данного региона.

Анализы пробы (зерен золотин) выполнены в физико-химической лаборатории ЦНИГРИ (Москва).

Исследование проводилось в Лок-Карабахской структурно-формационной зоне Малого Кавказа, где находится ряд золотосодержащих колчеданных (Гедабек, Гызылбулаг, Гоша) и колчеданно-полиметаллических (Дагкесаман) место-

рождений, которые могут иметь существенное значение для развития в республике золотодобывающей промышленности. Поэтому подробное изучение типоморфных признаков самородного золота и их практическое значение сегодня представляется весьма актуальным.

В таблице 1 сопоставлены характеристики самородного золота разных типов руд месторождений. Показано, что месторождения каждого типа различаются в своем большинстве по комплексу признаков самородного золота, наиболее отражающих специфику их образования [3].

Установленные типоморфные особенности самородного золота дают возможность для решения вопросов, связанных непосредственно с практикой геологоразведочных работ, в частности, установления минералогических поисков критериев, выделения перспективных площадей для детальных поисков золоторудных и золотосодержащих месторождений.

Использование в комплексе типоморфных признаков самородного золота с другими исследованиями (геофизическими, геоморфологическими) может существенным образом повлиять на повышение эффективности поисковых работ [5]. Это особенно важно в связи с тем, что в настоящее время на проведение поисков затрачивается большая часть ассигнований геологоразведочных работ, в том числе на буровые работы.

Так, установленная морфология, содержание и состав элементов-примесей, пробность и внутреннее строение самородного золота позволяют определять уровень эрозионного среза и вскрытых рудных тел.

Выявление внутреннего строения самородного золота – однородное, неясно-зональное, зернистое, зональное и колломорфное, которые способствуют определению минералогических критериев, позволяющих судить об образовании руд, глубине отложения, стадийности и этапности рудообразования и наличии пострудных деформаций [6].

Установленные нами типоморфные особенности самородного золота, характерные для руд колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений Лок-Карабахской СФЗ, позволяют оценить и определить наиболее рациональные технологические схемы и переработки, что, безусловно, будет иметь большое технологическое значение при освоении этих месторождений.

Известно, что в пределах Лок-Карабахской СФЗ расположены колчеданные (Гедабек, Гызылбулаг, Гоша) и колчеданно-полиметаллические месторождения. При этом самородное золото в них имеет различные типоморфные характеристики.

В связи с этим рассматриваемые месторождения золотосодержащих руд данного региона характеризуются различными технологическими способами их переработки (табл.2).

Эффективное выделение золота из руд в значительной степени зависит от ряда его типоморфных особенностей, в том числе размеров золотин и форм выделения (свободная, видимая, мелкая, тонкодисперсная, заключенные в сульфидах, различные ассоциации срастаний с другими сульфидными минералами).

**Таблица 1 –** Типоморфные особенности самородного золота колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений Лок-Карабахской СФЗ Малого Кавказа
**Table 1** – Typomorphic features of the native gold of the pleated and pleated polymetallic deposits of the Lok-Karabakh SFZ of the Lesser Caucasus

| **Золото-медно-колчеданные** | **Золото-кварц-медно-колчеданные** | **Золото-колчеданные** | **Золото-кварц-полиметаллическое** | **Золото-барит-полиметаллическое** |
|---|---|---|---|---|
| **Месторождения** | | | | |
| **Гедабек** | **Гызылбулаг** | **Гоша** | **Дагкесаман** | **Маднеули** |
| **Золотоносные минеральные ассоциации** | | | | |
| Основная-пирит-халькопирит-сфалеритовая. Второстепенная-кварц-пиритовая с тонкодисперсным золотом | Основная-кварц-халькопиритовая и халькопирит-сфалеритовая. Малопродуктивная-кварц-пиритовая с тонкодисперсным золотом | Основная-кварц-золото-теллуридная и кварц-золото-гетит-гидрогетитовая. Малопродуктивная-кварц-пиритовая с тонкодисперсным золотом | Основная-сульфидно-полиметаллическая с галенитом и сфалеритом. Малопродуктивная-кварц-пиритовая с тонкодисперсным золотом | Основная-сульфидно-полиметаллическая с галенитом и сфалеритом. Малопродуктивная-кварц-пиритовая с тонкодисперсным золотом |
| **Размеры, mm** | | | | |
| В аншлифах: 0,001-0,03, в проб-протолочек руд: 0,01-2,0. Доминирует тонкодисперсное золото | В аншлифах: 0,14-0,20, в проб-протолочек руд: 0,08-2,0. Преобладает тонкодисперсное и мелкое золото | В аншлифах: 0,001-0,01, в проб-протолочек руд: 0,1-0,063. Доминирует пылевидное и тонкодисперсное золото | В аншлифах: 0,01-0,015, в проб-протолочек руд: 0,01-0,3; реже 2,0. Пылевидное и очень мелкое золото | В аншлифах: 0,01-0,05, в проб-протолочек руд: 0,01-0,25; реже 2,5. Пылевидное и мелкое золото |
| **Формы выделений** | | | | |
| В аншлифах: округлые, пластинчатые, каплевидные, неправильные, изометричные. В проб-протолочек руд: неправильные, комковидные, интерстициальные, жилковидно-пластинчатые, редуцированные кристаллы | В аншлифах: овальные, неправильные, угловатые, губчатые. В проб-протолочек руд: комковидные, дендритовые, жилковидно-пластинчатые, октаэдерические кристаллы | В аншлифах: угловатые, пластинчатые, овальные, неправильные, округлые. В проб-протолочек руд: пластинчатые, прожилковатые, дендритовые | В аншлифах: прожилковые, угловатые, неправильные, пластинчатые, ячестые. В проб-протолочек руд: прожилковые, дендритовые, губчатые | В аншлифах: неправильные, округлые, пластинчатые, изометричные, пластинчатые, каплевидные. В проб-протолочек руд: прожилковые, дендритовые, каркасные |

| **Пробность, %** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 545-847<br>746<br>Модальное значение попадает в диапазон 700-800. Доминирует низкопробное золото | 652-953<br>819<br>Модальное значение попадает в диапазон 800-900. Доминирует среднепробное золото | 690-930<br>810<br>Модальное значение попадает в диапазон 800-850. Доминирует среднепробное золото | 800-950<br>830<br>Модальное значение попадает в диапазон 800-900. Преобладает среднепробное золото при значительных вариациях | 760-980<br>885<br>Модальное значение попадает в диапазон 900-950. Преобладает высокопробное золото |
| **Элементы примеси, %** | | | | |
| Cu-0,08-0,012; Fe-0,095-0,006; Sb-0,03-0,04; Bi-0,02-0,005; Mn-0,0001-0,002; Hg-0,1-1,27; As-0,002. Присутствуют повышенные концентрации Hg, Sb | Cu-0,18-0,20; Fe-0,057-0,07; Mn-0,0001-0,002; Hg-0,11-0,24; Sb-0,002-0,003; As-0,0015. Присутствует повышенные концентрации Cu | Cu-0,008-0,01; Fe-0,01-0,22; Pb-0,003-0,004; As-0,001-0,002; Te-0,02-0,05; Sb-0,06-0,08; Bi-0,03-0,04; As-0,02-0,0030. Отмечаются повышенные концентрации Fe, Te, Sb | Cu-0,08-0,15; Fe-0,27-0,32; Pb-0,28-0,33; Zn-0,013-0,21; Te-0,001-0,006; Bi-0,01-0,62; Mo-0,003. Присутствуют повышенные концентрации Pb, Zn, Fe | Pb-0,26-0,31; Zn-0,19-0,24; Cu-0,06-0,014; Fe-0,17-0,20; Te-0,001-0,003; Bi-0,01-0,05; Sb-0,002-0,03. Присутствует повышенные концентрации Pb, Zn |
| **Внутренние строения** | | | | |
| Неяснозональная, зернистая, калломорфнозернистая, пятнистая, неоднородная. Преимущественно зональная, неяснозональная | Однородная, монозернистая, дендритовая, зональная. Преимущественно однородная, зернистая | Однородная, неясно-зональная, монозернистая, зональная. Преобладает монозернистая, неяснозональная | Монозернистая, однородная, неяснозернистая, пятнистая. Преимущественно дендритовая | Зернистая, монозернистая, губчатая, неяснозональная. Преимущественно губчатая |

По мнению исследователей [2], крупность самородного золота и форма его срастаний с окружающими сульфидными минералами является весьма существенным фактором для определения технологических свойств минерального сырья. Так, для золота, находящегося в рудах в тонкодисперсном состоянии (Гедабек, Гоша), принимаются кучная, чановая и агитационная (цианирование) технологические схемы переработки, а при присутствии в рудах более крупного золота и их срастании с сульфидными минералами (Гызылбулаг, Дагкесаман, Маднеули) принимается флотационная и гравитационная технологические схемы (табл. 2). Следует подчеркнуть, что из рассматриваемых в таблице 2 месторождений только Гедабекское и Маднеульское в настоящее время промышленно осваиваются. В настоящее время Гедабекское месторождение эксплуатируется Американской компанией “RV Investment Group Services” LLC.

**Таблица 2 –** Технологические типы и способы переработки месторождений Лок-Карабахской СФЗ Малого Кавказа
**Table 2 –** Process types and methods of processing of fields of the Lok-Karabakh SPZ of the Lesser Caucasus

| № | Название месторождений | Типы руд | Минеральный состав руд | Характеристика золота | Минеральные ассоциации золота | Технологические особенности руд | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Технологический тип | Схемы обогащения |
| **1** | Гедабек | Золото-медно-колчеданные | Пирит Халькопирит Сфалерит Самородное золото | Мелкое и тонкодисперсное | Пирит-халькопирит-сфалеритовые | Золото Серебро Медь | Кучное и чановое, Агитационное выщелачивание (цианирование), Флотация |
| **2** | Гызылбулаг | Золото-кварц-медно-колчеданные | Халькопирит Пирит Кварц | Мелкое и тонкодисперсное | Кварц-халькопиритовые | Золото Серебро Медь | Флотация, Гравитация |
| **3** | Гоша | Золото-колчеданные | Пирит Гасит Петцит | Пылевидное и тонкодисперсное | Кварц золото-теллуридные | Золото Серебро Колчедан | Флотация, Агитационное цианирование сульфидного концентрата |
| **4** | Дагкесаман | Золото-кварц-полиметаллические | Сфалерит Галенит Халькопирит | Пылевидное и очень мелкое | Кварц-галенит-сфалеритовые | Золото Серебро Полиметалл | Гравитация, Флотация |
| **5** | Марнеули | Золото-барит-полиметаллические | Галенит Сфалерит | Пылевидное и мелкое | Сфалерит-галенитовые | Золото Серебро Полиметалл | Гравитация, Флотация, Кучное выщелачивание |

Окисление руды Гедабекского месторождения перерабатывается методом агитационного выщелачивания (цианирования) и флотационного обогащения с получением высококачественного медного концентрата.

Маднеульское месторождение медно-колчеданных руд перерабатывается методом флотационного обогащения, а породы, характеризующиеся как золотосодержащие вторичные кварциты, перерабатываются методом кучного цианидного выщелачивания (см. табл. 1).

Технология переработки первичных золото-колчеданных руд Гызылбулагского месторождения испытана в полупромышленных условиях. Рекомендована комбинированная гравитационно-флотационная технология с получением качественного флотоконцентрата золота [1]. Технология остальных месторождений (Гошинское, Дагкесаманское) испытана и

рекомендована по результатам лабораторных исследований.

**Заключение**

Установленные типоморфные признаки самородного золота, их совокупность, изменчивость, гранулометрический состав, морфология, пробность, элементы-примеси и внутренняя структура имеют практическое значение при прогнозировании глубины в золотосодержащих месторождениях и дают возможность для решения вопросов, связанных непосредственно с практикой геологоразведочных работ, в частности, установления минералогических поисковых критериев, выделения перспективных площадей.

Установленный гранулометрический состав (размеры золотин) и золотоносные минеральные ассоциации позволяют оценить и определить рациональные технологические схемы переработки золотосодержащих руд, которые будут иметь практическое значение в промышленном освоении месторождений.

**REFERENCES**

1. **Esmaeil Jahanshahi.** Control Solutions for Multiphase Flow Linear and nonlinear approaches to anti-slug control, Trondheim, October 2013 *(in English)*
2. **Ismayilov G.G., Adigozalova M.B., Ismayilova F.B., Zeynalova G.A.** Study of the effect of ballast on the macroscopic parameters of oil mixtures // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, vol. 12, №1, 2020 *(in Russian)*
3. **Chinedu I. Ossai.** Advances in Asset Management Techniques: An Overview of Corrosion Mechanisms and Mitigation Strategies for Oil and Gas Pipelines, Vol. 2012. cleID 570143. https://doi.org/10.5402/2012/570143 *(in English)*
4. **Lekan Taofeek Popoola, Alhaji Shehu Grema, Ganiyu Kayode Latinwo, Babagana Gutti & Adebori Saheed Balogun.** Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, Published: 27 September 2013 *(in English)*
5. **Ilman M.N., Kusmono.** Analysis of internal corrosion in subsea oil pipeline, 2013 *(in English)*
6. **Adegboyega Bolu Ehinmowo, Yi Cao.** Stability analysis of slug flow control, Published online: 31 Jul. 2016 *(in English)*

# 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** elektron ünvanına göndərilməlidir.

Məqalə azərbaycan, ingilis və ya rus dillərində 10 səhifədən çox olmamaq şərtilə 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. Annotasiya, 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, mətndəki 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 proseduru-ndan 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. Müəl-liflərin təkrar düzəlişlərindən sonra məqalə yenidən rəyçilərə gön-dərilir, 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 şəklində də redaksiyaya təqdim edilməlidir.

Əlyazmanın nəşri üçün müəlliflərdən ödəniş alınmır.

Daha çox məlumat və məqalənin tərtibatı nümunəsi saytda: **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.**

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 взымается.

Более подробная информация и образец оформления статьи – на сайте: **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**

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. Annotation (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**

**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 14. № 3
Vol. 14. № 3
Том 14. № 3

**BAKI – 2022**

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 27.09.2022,*
*formatı 60x84 1/8,*
*kağız ofset, f.ç.v. 16.5*
*Tirajı 1105 əd.*