



# 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 13. № 2  
Vol. 13. № 2  
Том 13. № 2

**BAKİ – 2021**

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

**BAŞ REDAKTOR – AKADEMİK A.M. PAŞAYEV**  
Baş redaktorun müavini – akademik Ə.X. Canəhmədov

***REDAKSİYA HEYƏTİ:***

akademik Ə.M. Abbasov, akademik R.I. 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 I.R. Sadıqov

***REDAKSİYA ŞURASI:***

prof. N. Antoneski (*Rumuniya*), prof. Konstantin Bravo (*İsrail*), prof. F. Franek (*Avstriya*),  
prof. K. Fridrix (*Almaniya*), akademik B.T. Jumaqulov (*Qazaxistan*), prof. G.S. Kalda (*Polşa*), prof.  
D. Mavrakis (*Yunanistan*), akademik S.S. Neqmatov (*Özbəkistan*), akademik S.V. Panin (*Rusiya*),  
akademik A.İ. Prangışvili (*Gürcüstan*), akademik R.Z. Saqdeyev (*ABŞ*), prof. Junq-Young Son (*Koreya*),  
akademik Ə.X. Şahverdiyev (*Rusiya*), akademik A.İ. Vasilyev (*Ukrayna*),  
prof. Tuncay Yalçinkaya (*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*)

**TƏSİŞÇİ: "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası" ictimai birlüyü.**

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

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyində qeydiyyata alınmışdır. Qeydiyyat № 2965, 23.06.2009-cu il.

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

Jurnal "Rusiyadan elmi sitat indeksləşməsi" (RESI) layihəsinə daxil edilib.

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

Nəşr olunmuş məqalələrə DOI (Obyektin Rəqəmsal İdentifikatoru) verilir.

Jurnal International Scientific Indexing (ISI) Beynəlxalq Elmi Sitatlaşma Bazasına yerləşdirilib və SERTİFİKAT verilib, impakt faktor – 1,327.

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

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"

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

**Redaksiyanın ünvani:**

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>

REKLAMALARIN YERLƏŞDİRİLMƏSİ  
İLƏ ƏLAQƏDAR REDAKSİYAYA  
MÜRACİƏT EDƏ BİLƏRSİNİZ

**FOUNDER: Public union  
"Azerbaijan Engineering Academy"**

Journal published since November, 2009.  
Issued 4 times a year.

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

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

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

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

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

Journal was included into International Scientific Indexing (ISI) and issued a CERTIFICATE, impact-factor - 1.327.

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>

CONCERNING ADVERTISING  
PLACING TO ADDRESS  
IN EDITION

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

Журнал издается с ноября 2009 года.

Периодичность: 4 раза в год.

Зарегистрирован Министерством Юстиции Азербайджанской Республики.

№ регистрации: 2965 от 23.06.2009 г.

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается Цифровой Идентификатор Объекта DOI.

Журнал размещен в Международной базе научного цитирования International Scientific Indexing (ISI) и выдан СЕРТИФИКАТ, импакт-фактор - 1.327.

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». Подписка продолжается в течение года.

Индекс подписки для юридических и физических лиц: 1156.

**Адрес редакции:**

Азербайджан,  
AZ1010, Баку,  
ул. Пушкина, 30, 3-й этаж.  
Тел./Факс: (+99412) 598 24 52  
E-mail: amaxeber@yahoo.com  
<http://ama.com.az>

ПО ВОПРОСАМ РАЗМЕЩЕНИЯ  
РЕКЛАМЫ ОБРАЩАТЬСЯ  
В РЕДАКЦИЮ



РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС  
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ  
**Science Index**



ISSN 2076-0515

© Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası, 2021

© Azerbaijan Engineering Academy, 2021

© Азербайджанская Инженерная Академия, 2021

## M Ü N D Ö R İ C A T

### M e x a n i k a və m a s i n q a y i r m a

**Paşayev A.M., Canəhmədov Ə.X.**

Polimer plynokaların səthin mikroprofilini üzrə gərginliyinin qiymətləndirilməsinə stoxastik yanaşma ..... 7

**Cavadov M.Y., Dolışniy B.V., Skripnik V.S., Juravlyov D.Y., Nəsirova M.M.,**

**Volçenko N.A., Malik L.B.**

Nəqliyyat vasitələrinin bütöv diskində termiki potensialın qiymətləndirilməsi məsəlesi ..... 27

**Qafarzadə H.V.**

Çoxfaktorlu əməliyyatların və mürəkkəb texnoloji proseslərin modelləşdirilməsi, optimallaşdırılması və idarə edilməsi metodlarının analizi ..... 40

**Canəhmədov Ə.X., Dışın O.A., Həbibov İ.Ə., Ağaməmmədova S.Ə., Həsənzadə İ.S.**

Kəsir törəmələrindən istifadə etməklə polimerlərdə termoooksidləşdirici distruksianın kinetik əyrilərinin izahı (I hissə) ..... 48

**Cavadov M.Y., Volçenko D.A., Skripnik V.S., Volçenko N.A.,**

**Yevçenko A.S., Vudvud A.N.**

Öyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodları (I hissə) ..... 58

### N e f t və q a z

**Əliyev Ə.M.**

Piston effektini nəzərə almaqla qazına alətinin quyuya endirilmə rejiminin müəyyən olunması ..... 69

**İsmayılova F.B., İskəndərov E.X.**

Təzyiqin multifazalı neft kəmərinin buraxma qabiliyyətinə təsiri haqqında ..... 78

### K i m y a və n e f t - k i m y a t e x n o l o g i y a sı

**Alxanov P.Ş., Rəcəbova M.C., Cəfərov V.C., Şərifova M.T.,**

**Hacıyeva E.M., Məmmədova M.İ., Aslanova Z.A.**

İşlənilmiş aşağı sıxlıqlı polietilen və Daşsalahlı yatağı əhəngdaşı əsasında polimer kompozisiyası ..... 84

**Qurbanov H.R., Adıgözəlova M.B., Paşayeva S.M.**

Depressor aşqarın və neft komponentlərinin səthi gərilmə əmsalının tədqiqi ..... 89

### E n e r g e t i k a

**Sultanov E.F., Məmmədov E.M.**

Gəmi göyərtə mexanizmlərinin elektrik intiqallarının vektorlarla idarə olunmasının xüsusiyyətləri ..... 95

### I n f o r m a s i y a t e x n o l o g i y a l a rı

**Eminov R.Ə.**

Yağışın GPS siqnallarının troposfer gecikməsinə etdiyi təsirinin qiymətləndirilməsi ..... 101

### I q t i s a d i v y a t

**Canəhmədov E.Ə.**

Aziya seçimlərinin Monte-Carlo metodu ilə qiymətləndirilməsi ..... 107

### E k o l o g i y a

**Əzizov B.M., Xəlilova X.S.**

Peyk informasiyası əsasında sənaye mərkəzlərində atmosfer aerozollarının qiymətləndirilməsinin bəzi aspektləri ..... 113

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

**Hüseynov Q. S.**

Gədəbəy qızıl-mis-kolçedan yatağının (Kiçik Qafqaz) mineral əmələgəlmə etapı və filizin tekstur-struktur xüsusiyyətləri, mineral tərkibi ..... 121

## C O N T E N T S

### Mechanics and Mechanical Engineering

**Pashayev A.M., Janahmadov A.Kh.**

Stochastic approach to estimating stresses of polymer films from the surface microprofile ..... 7

**Javadov M.Y., Dolishniy B.V., Skrypnyk V.S., Zhuravlev D.Y.,**

**Nasirova M.M., Volchenko N.A., Malyk L.B.**

Assessment of thermal potential in disc brake of transportation unit ..... 27

**Gafarzada H.V.**

Analysis of modeling, optimization and control methods of multifactor operations and complex technological processes ..... 40

**Janahmadov A.Kh., Dyshin O.A., Habibov I.A., Agammedova S.A., Gasanzade I.S.**

Application of fractional derivatives for the description of kinetic curvature of thermooxidation destruction of the polymers (Part I) ..... 48

**Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A.,**

**Evchenko A.S., Vudvud A.N.**

Physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices (Part I) ..... 58

### Oil and Gas

**Aliyev A.M.**

Determination of the running mode of the drilling tool into the borehole taking into account the piston effect ..... 69

**Ismayilova F.B., Iskandarov E.Kh.**

The effect of the pressure on the discharge of multiphase oil pipeline ..... 78

### Chemical Technology

**Alkhanov R.Sh., Rajabova M.D., Jafarov V.D., Sharifova M.T.,**

**Hajieva E.M., Mammadova M.I., Aslanova Z.A.**

Polymer composition based on spent low density polyethylene and limestone of Dashsalakhly deposit ..... 84

**Gurbanov G.R., Adygezalova M.B., Pashayeva S.M.**

Investigation of the surface tension coefficient of the depressant additive and components of oil .. 89

### Energetics

**Sultanov E.F., Mammadov E.M.**

Features of vector control of electrical transmission of ship dext mechanisms ..... 95

### Information Technologies

**Eminov R.A.**

Assements of the influence of rain on tropospheric delay of GPS signals ..... 101

### Economics

**Janahmadov E.A.**

Pricing Asian Options with Monte-Carlo Method ..... 107

### Ecology

**Azizov B.M., Khalilova Kh.S.**

Some evaluation aspects of atmospheric aerosol in industrial centers on the basis ofsatellite information ..... 113

### Geology

**Guseynov G.S.**

The mineral composition and textural-structural peculiarities of the ore, and mineral formation stage of the Gedabek gold-copper deposit (Lesser Caucasus) ..... 121

## СОДЕРЖАНИЕ

### Механика и машиностроение

**Пашаев А.М., Джанахмедов А.Х.**

Стохастический подход к оценке напряжений полимерных плёнок по микропрофилю поверхности ..... 7

**Джавадов М.Я., Долишиний Б.В., Скрыпнык В.С., Журавлев Д.Ю., Насирова М.М., Вольченко Н.А., Малык Л.Б.**

Оценка термического потенциала в сплошном диске тормоза транспортного средства ..... 27

**Гафарзаде Х.В.**

Анализ методов моделирования и оптимизация и управления многофакторными операциями и сложными технологическими процессами ..... 40

**Джанахмедов А.Х., Дышин О.А., Габибов И.А., Агаммедова С.А., Гасанзаде И.С.**

Применение дробных производных для описания кинетических кривых термоокислительной деструкции полимеров (часть I). ..... 48

**Джавадов М.Я., Вольченко Д.А., Скрыпнык В.С., Вольченко Н.А., Евченко А.С., Вудвуд А.Н.**

Физические методы оценки нагрузки трения пар тормозных устройств (часть I) ..... 58

### Нефть и газ

**Алиев А.М.**

Определение режима спуска бурового инструмента в скважину с учетом поршневого эффекта ..... 69

**Исмайлов Ф.Б., Искендеров Э.Х.**

О влиянии давления на пропускную способность мультифазных трубопроводов ..... 78

### Химия и нефтехимические технологии

**Алханов Р.Ш., Раджабова М.Д., Джрафоров В.Д., Шарифова М.Т.,**

**Гаджиева Э.М., Мамедова М.И., Асланова З.А.**

Полимерная композиция на основе отработанного полиэтилена низкой плотности и известняка Дащсалахлинского месторождения ..... 84

**Гурбанов Г.Р., Адыгезалова М.Б., Пашаева С.М.**

Исследование коэффициента поверхностного напряжения депрессорной присадки и компонентов нефти ..... 89

### Энергетика

**Султанов Э.Ф., Мамедов Э.М.**

Особенности векторного управления электроприводом судовых палубных механизмов ..... 95

### Информационные технологии

**Эминов Р.А.**

Оценка влияния дождя на тропосферную задержку GPS сигналов ..... 101

### Экономика

**Джанахмедов Э.А.**

Ценообразование азиатских опционов по методу Монте-Карло ..... 107

### Экология

**Азизов Б.М., Халилова Х.С.**

Оценка атмосферных аэрозолей в промышленных центрах на основе спутниковой информации ..... 113

### Геология

**Гусейнов Г.С.**

Минеральный состав и текстурно-структурные особенности руды, этапы минералообразования Гедабекского золотомедного месторождения (Малый Кавказ) ..... 121

## Stochastic Approach to Estimating Stresses of Polymer Films from the Surface Microprofile

**A.M. Pashayev, A.Kh. Janahmadov**

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

**For correspondence:**

Janahmadov Ahad / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

**Abstract**

The existing methods for determining the internal (residual, shrinkage) stresses arising from the curing of thin films of paint and varnish coatings (PVC), based on the cantilever bending of the substrate and the difference in the thicknesses of the wet and dry coatings, are analyzed. The dependence of their accuracy on the film / substrate thickness ratio and the uniformity of the applied film is noted. The application of atomic force microscopy methods based on measuring the geometry of the regular microrelief (RMR) of the film surface, which serves as a characteristic manifestation of its shrinkage deformations, is considered. It is noted that when applying the Euler problem on the stability of a compressed rod, the method demonstrates the calculated stress values unattainable for most polymers. The calculation of internal stresses and strains was carried out on the basis of a stochastic approach, taking into account the "checkerboard" distribution of deformation defects on the outer surface of the film. On the example of RMR film of polyester urethane varnish, the level of internal stresses was assessed using the proposed and existing methods. The values of internal stresses obtained by the three methods relatively coincide with each other, the difference between them does not exceed ~20%.

**Keywords:** paint and varnish coating (PVC), substrate, regular microrelief (RMR), shrinkage, shrinkage stresses, internal stresses, curing, polyester urethane varnish, thin film.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_7\_26

**For citation:**

Pashayev A.M., Janahmadov A.Kh.

[Stochastic Approach to Estimating Stresses of Polymer Films from the Surface Microprofile]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, vol. 13, № 2. Pp. 7 –26 (in English).

## Polimer pylonkaların səthin mikroprofilini üzrə gərginliyinin qiymətləndirilməsinə stoxastik yanaşma

A.M. Paşayev, Ə.X. Canəhmədov

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

### Yazışma üçün:

Canəhmədov Əhəd / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Annotasiya**

Lak-boya örtüklərinin (LBÖ) nazik pylonkalarının sərtləşməsi zamanı yaranan, müvafiq olaraq, alt qatın konsol əyilməsinə, həmçinin yaş və quru səthlərin qalınlıqlarının fərqinə əsaslanan daxili (qalıq, büzülmə) gərginliyin təyin olunmasının mövcud üsulları təhlil olunub. Onların dəqiqliyinin pylonkanın/alt qatın qalınlığı nisbətindən və pylonkanın bərabərliyindən asılılığı qeyd olunub. Pylonkanın səthinin büzülmə deformasiyalarının xarakterik təzahürü kimi xidmət edən müntəzəm mikrorelyefinin (MMR) həndəsi parametrlərinin ölçülülməsinə əsaslanan atom-qüvvə mikroskopu metodu ilə tətbiqinə baxılıb. Qeyd olunub ki, sixilmiş çubuğuñ dayanıqlığı haqda Eyler məsələsinin təbliği zamanı bu metod əksər polimerlər üçün əlçatmadır hesab olunan gərginliyin hesablanmış qiymətini nümayiş etdirir. Daxili gərginliyin və deformasiyanın hesablanması pylonkanın xarici səthində deformasiya nöqsanlarının "şahmat" paylanması nəzərə alaraq, stoxastik yanaşma əsasında aparılıb. Poliefiruretan boyanın MMR pylonkalar nümunəsində təklif olunan və mövcud metodlardan istifadə edilərək daxili gərginlik səviyyəsinin qiymətləndirilməsi aparılıb. Hər üç metodla alınan daxili gərginlik kəmiyyətlərinin qiymətləri, bir-biri ilə nisbətən uyğun gəlir, onlar arasındakı fərq ~20% həddindədir.

**Açar sözlər:** lak-boya örtüyü, alt qat, müntəzəm mikrorelyef, büzülmə, büzüçü gərginlik, daxili gərginlik, sərtləşmə, poliefiruretan boyası, nazik pylonka.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_7\_26

УДК: 539.219.2

## Стochasticный подход к оценке напряжений полимерных плёнок по микропрофилю поверхности

A.M. Paşaev, A.X. Janahmadov

Национальная авиационная академия Азербайджана (Мардакянский просп., 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

### Для переписки:

Джанахмедов Ахад / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Аннотация**

Проанализированы существующие методы определения внутренних (остаточных, усадочных) напряжений, возникающих при отверждении тонких плёнок лакокрасочных покрытий (ЛКП), основанные на консольном изгибе подложки и разности толщин мокрого и сухого покрытия, соответственно. Отмечена зависимость их точности от соотношения толщин плёнка/подложка и однородности нанесённой плёнки. Рассмотрено применение методов атомно-силовой микроскопии, основанных на измерении геометрии регулярного микрорельефа (РМР) поверхности плёнки, служащего в качестве характерного проявления её усадочных деформаций. Отмечено, что при применении задачи Эйлера об устойчивости сжатого стержня метод демонстрирует недостижимые для большинства полимеров расчётные значения напряжения. Расчет внутренних напряжений и деформаций проведен на основе стохастического подхода с учетом «шахматного» распределения деформационных дефектов на наружной поверхности пленки. На примере РМР плёнки полиэфиуретанового лака проведена оценка уровня внутренних напряжений с использованием предлагаемой и существующих методик. Значения величин внутренних напряжений, полученные по трём методам, относительно совпадают друг с другом, разница между ними не превышает ~20%.

**Ключевые слова:** лакокрасочное покрытие, подложка, регулярный микрорельеф, усадка, усадочные напряжения, внутренние напряжения, отверждение, полиэфиуретановый лак, тонкая плёнка.

## Introduction

Protective paint and varnish coatings (PVC) of external surfaces of aircraft (AC) in the process of application and operation undergo a significant mechanical impact, weakening the strength of the film and can lead to a violation of its continuity.

During hardening of PVC, the paintwork goes through the shrinkage (contraction) as a result of the evaporation of volatile components, polymerization, gelation, temperature drops and other processes. The adhesion contact and microroughness of the relief of a rigid substrate do not allow the polymer film to freely shrink ("shrink"), as a result of which it shrinks in thickness and internal tensile stresses arise in it [1].

All this creates a number of problems associated with ensuring the strength and durability of protective coatings. Numerous publications of domestic and foreign authors are devoted to the study of the processes developing in the "substrate - coating" system ("flexible base - thin film", etc.), among which the works of V.Ye. Panin [2], and J.Hutchinson [3] et al.

The internal (synonyms - residual, shrinkage) stresses sharply weaken the cohesive and adhesive strength of the newly formed film, thereby accelerating the destructive physicochemical processes that cause its premature destruction during operation [4, 5, 6, 7].

Since the internal stresses largely determine the final morphology and properties of the coating and do not depend on the nature of the substrates [8], the assessment of their level is of theoretical and practical interest.

A number of methods for determining shrinkage stresses in thin-film structures on rigid substrates are currently known. One of the first was the proposed method developed

independently by A.T. Sanzharovsky and E. Korkoran and based on the calculation of stresses in the coating by the magnitude of deformations (deflection) of the substrate (cantilever bending tape) [9, 10, 11].

As a result, these works formed the basis of GOST 13036-67 (currently not valid according to IUS 7-77) [12] and its current American analogue ASTM D6991-05 [13].

**Purpose of work** is to develop and test a method for determining the level of shrinkage stresses in curried PVC based on the characteristics of its microrelief and its comparison with the values obtained using existing techniques. A preliminary analysis of linear disturbances is carried out, which determines the kinetics and energetics of the corrugation process, as well as the amplitude and wavelength of steady-state oscillations.

Due to the uncontrollability of external conditions affecting the properties of the sample, a stochastic approach was used to calculate the internal stresses and strains, taking into account the features of the film – substrate interface.

## Problem Statement

In this regard, the authors analyzed the kinetics and energetics of growth of film disturbances as a result of the effect of loading the substrate on the deformation of the film prior to its solidification through the interface through a viscoelastic layer lying directly under the film. As a result, by measuring the geometry of the RMR, the critical values of the parameters of the film vibrations are estimated, at which the vibrations acquire stability with the corresponding steady-state values of the amplitude and wavelength [14].

The cured thin polymer film is taken to be the surface layer of the bulk of the substrate material with a surface layer / substrate interface thickness equal to the film thickness. The loaded solid body of the substrate induces a "checkerboard" distribution of stresses and strains through the film / substrate interface, carrying deformation defects to the film surface. To calculate normal and tangential stresses, a stochastic approach was used, taking into account the conditions for the formation of nonlinear waves of localized plastic flow of the parameters of the elements of the system under consideration at the meso and microscale levels.

### Materials and existing methods for calculating internal stresses

A two-component polyether urethane (PEU) varnish ( $E = 30 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0.35$  [15]) was chosen as the PVC under study. The varnish components (polyester and hardener) were mixed before application and applied to a substrate (plate  $102 \times 12 \times 0.254\text{mm}$  made of 08X18H10T steel,  $E = 1.96 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0.29$  [16]) according to the manufacturer's instructions.

The thickness of the film before and after curing was measured in accordance with [17, 18, 19], respectively. Based on the data obtained by methods [12] and [13], using formulas (1) and (2), the internal stresses in the PVC were calculated.

To determine the internal stresses by the proposed method, the RMR of the surface of the hardened film was investigated on an AFM SOLVER NEXT (NT-MDT, Russia). The measurement was carried out by line-by-line scanning of a surface area  $50 \times 50 \mu\text{m}$  in size, as a result, two- and three-dimensional topographic images are formed, a profilogram is

automatically calculated. As a sample, a fragment of  $5 \times 5 \times 0.254\text{mm}$  in size was used, cut from the above steel plate after conducting research according to the methods [12, 13].

The essence of the technique lies in the fact that the coating is applied to one surface of a flat sample (tape), which is cantilever clamped in a rigid fixation. During the drying process, internal stresses arise in the coating, as a result of which the free end of the cantilever deviates from its original position by an amount  $d$  (deflection).

The calculation of internal stresses is usually carried out according to the following formula:

$$\sigma = \frac{dE_s t^3}{3L^2 c(t+c)(1-\mu_s)} + \frac{dE_c(t+c)}{L^2(1-\mu_c)} \quad (1)$$

where  $d$  – the deflection (deflection) of the free end of the console;  $E_s$  – Young's modulus of the steel substrate;  $\mu_s$  is the Poisson's ratio of the steel substrate;  $L$  – the length of the console;  $t$  is the thickness of the console;  $c$  – a coating thickness;  $E_c$  – Young's modulus of the hardened coating;  $\mu_c$  – Poisson's ratio of the coating material.

As follows from formula (1), in order to calculate internal stresses, the cantilever method requires knowledge of eight Parameters of the film and substrate (cantilever deflection, geometric dimensions of the substrate, mechanical characteristics).

The cantilever method is applicable for films with a thickness of  $25\dots380\mu\text{m}$ . The accuracy of the method is highly dependent on the film / substrate ratio and the uniformity of the applied film. Some difficulty of such measurements lies in the fact that, in addition to the shrinkage of the paintwork, the deflection of the tape-console is affected by such a difficult factor as the weight of the coating itself, which gradually decreases as it dries.

Compared with this method, a more simplified formula was proposed in [14] to determine internal stresses in coatings:

$$\sigma = \frac{E(h_0 - h_1)}{h_0} \quad (2)$$

where  $h_0$  – the initial “wet” film thickness;  $h_1$  – a film thickness after curing;  $E$  – Young's modulus of the hardened coating.

The thickness of the cured film  $h_1$  is determined according to the standards [17] by microscopic examination of the cross section. Accurate measurement of the initial (“wet”)  $h_0$  thickness of a thin layer of paint and varnish material (PVM)<sup>1</sup> presents some difficulty. The existing methods for determining the thickness of “wet” polymer films [18, 19] prescribe direct measurements using a probe instrument in the form of a toothed plate – Rossman's “comb”. The protrusions (teeth) of the “comb” are immersed in the layer of the liquid film until they touch the substrate. The height of the wetted edge of the teeth is considered equal to the thickness of the coating. However, already in the description of these methods, it is noted that they are approximate, and on substrates with an uneven or textured surface, they may give erroneous readings.

In accordance with [20], for the paintwork of external surfaces, the  $R_z$  value (the sum of the average absolute values of the heights of the five largest profile protrusions and the depths of the five largest profile valleys) with a base length of 2.5 mm should be less than 0.001 mm (1  $\mu\text{m}$ ), i.e., the surface should have meso- and micro-scale irregularities.

According to the operational requirements [21, 22], the thickness of the cured paintwork

must be at least 20% higher than the maximum height of the microroughness of the substrate. If this requirement is met, the film under conditions of adhesive contact is no longer an equidistant surface copy of the smoothed microgeometry of the substrate but has its own regular microrelief (RMR) [23, 24, 25], formed under the action of deformation processes.

Currently, SIEBIMM-methods<sup>2</sup> for studying the mechanical properties of films have become widespread, involving the measurement of the geometric characteristics of their surface using atomic force microscopy (AFM). The appearance of RMR of thin films is considered by some authors on the basis of the Euler problem on the stability of a compressed rod: under a critical load, the film surface bends in the form of sinusoids with a period  $\lambda$  and an amplitude  $A$  [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

In the same works, it is noted that the wavelength of the folds does not depend on the magnitude of stresses, is determined by the characteristics of the film and substrate and is a constant value for a particular pair of materials “film – substrate”. In this case, the amplitude of the folds  $A$  does not depend on the elastic properties of the film and substrate but increases with increasing compressive stresses [33].

For films adhering to the substrate, wrinkling can occur only when the critical compressive stress  $\sigma_w$  is exceeded:

$$\sigma_w = \frac{E'_f}{4} \left( \frac{3E'_s}{E'_f} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

where  $E'_f = E_f / (1 - \mu_f^2)$  and  $E'_s = E_s / (1 - \mu_s^2)$

are the moduli of longitudinal elasticity,  $E_f$ ,  $E_s$ ,  $\mu_f$ ,  $\mu_s$  are Young's moduli and Poisson's

<sup>1</sup> The difference between paints and varnishes materials (PVM) and paints and varnishes coatings (PVC) is to some extent conditional and suggests that the former determine the physicochemical properties, the latter – the geometric size and mechanical properties of the layer.

<sup>2</sup> SIEBIMM – strain-induced elastic buckling instability for mechanical measurements

ratios of the film and substrate, respectively.

When the compressive stress  $\sigma$  exceeds  $\sigma_w$ , the film spontaneously bends, forming a periodic distribution of folds on the surface.

However, this explanation of relief formation presupposes loading by external horizontal loads, which cause the loss of stability of the already hardened film. But since the modulus of longitudinal elasticity of even hardened paintwork materials PVM ( $E'_f$ ) is approximately three orders of magnitude lower than that of a metal substrate ( $E'_s$ ), the stresses  $\sigma_w$  calculated by formula (3) will have values unattainable for most polymers, several times exceeding their ultimate strength. In this regard, this model of relief formation is inapplicable for paintwork PVC.

Apparently, from the moment the paintwork material is applied to the substrate, due to the viscoelastic transition from the liquid state to the solid state, the density of the upper layer increases, and an elastic surface film gradually forms, which impedes the further exit of the vapor-gas mixture from the underlying layer of paintwork materials PVM. Based on this, the paintwork PVC at the initial stage of curing can be represented as a two-layer system consisting of a thin elastic surface layer and an underlying deep viscoelastic layer [34, 35].

Probably, evaporating steam-gas flows, locally uplifting the elastic film during mass transfer, create internal stresses in it, forming a characteristic folded surface with a "checkerboard" effect of regular alternation of convex and concave zones [28]. The meso-substructure of the extruded material appears on the surface. According to the classification of scale levels, adopted in the works of V.E. Panin's school [2], the mesoscopic scale level is subdivided into mesoscale-1 ( $0.1 - 10 \mu\text{m}$ ) and mesoscale-2 ( $10 - 500 \mu\text{m}$ ) [29].

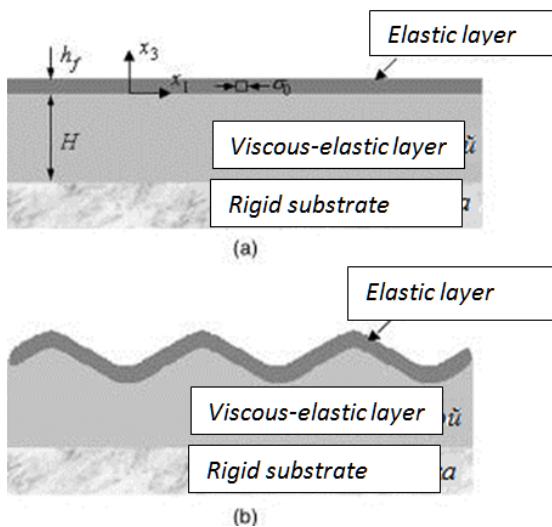
## Proposed approach to solving the problem

We consider the deformation of the cured top layer of the paint and varnish coating on the uncured bottom layer as a coherent deformation of an elastic film on a viscoelastic underlayer. As is known [36, 37], in this case, the parameters of folds are largely determined by the kinetics of their formation and growth. The mechanism of the wrinkling process formed by the layer underlying the film is usually interpreted as a stress-induced instability, similar to the buckling of an elastic bar under compression. If this layer has elasticity, then there is a critical compressive stress, above which the film begins to corrugate with the corresponding wavelength obtained by minimizing the total elastic energy of the film and substrate [38, 39, 40]. Under typical compressive stress, corrugations are formed only when the substrate is significantly softer than the film. If the substrate is elastic, then the corrugation becomes a kinetic process [40, 41, 42]. Since the viscous substrate does not have a reserve of elastic energy, the upper surface of the compressed covering film is always energetically unstable. The viscous flow on the substrate regulates the kinetics of corrugation growth by choosing the most growing wavelength. More generally, when the substrate is viscoelastic (for example, crosslinked polymers), both energy and kinetics play an important role. The spectrum of formed corrugated patterns experimentally observed in metal - polymer bilayers [43] demonstrates the features of the kinetic process. Analysis of linear perturbations shows that the viscoelastic property of the substrate has a significant contribution to the stability and kinetics of the corrugation process [37].

Let us consider the process of modeling the evolution of corrugation in a thin elastic - viscoelastic bilayer described in [36] in the

limiting case of analysis of linear perturbations. The generated model is based on the application of the nonlinear theory of Karman plates [44] to the elastic layer and the approximation of the viscoelastic layer using a thin layer. Although the model is applicable to 2D corrugation, the focus will be on one-dimensional corrugation under in-plane stress.

Consider an elastic film of thickness  $h_f$  resting on a viscoelastic layer of thickness  $H$ , which, in turn, lies on a rigid substrate in Fig. 1 [36].



**Figure 1** – The schematic of an elastic-viscoelastic bilayer on a rigid substrate: (a) standard state and (b) wrinkling state

In the initial state (Fig.1a), both layers have a flat shape, and the elastic layer is subjected to biaxial residual stress, and there are no traces on the bilayer surface. In the wrinkling state (Fig.1b), both in-plane displacements and out-of-plane displacements occur in the elastic layer caused by the residual stress  $\sigma_0$  ( $\sigma_0 < 0$ ), while the viscoelastic layer is simultaneously deformed. In Fig.1(a)  $x_1 - x_2$  denotes a plane in a rectangular Cartesian coordinate system that serves as an interface between two layers in a bilayer.

## Linear analysis of disturbances

The elastic film model will be formulated on the basis of Karman's nonlinear theory of bending of elastic plates [44]. Elastic deformations of the film are characterized by bulging (lateral deflection)  $w$  and displacement  $u_\alpha$  along the plane ( $\alpha = 1, 2$ ).

Suppose the viscoelastic layer experiences slight deflection from the horizontal position

$$w(x, t) = A(t) \cos kx \quad (4)$$

with amplitude  $A(t)$  and length  $L = 2\pi/k$  ( $k$  – a wave number). In the analysis of linear perturbations, the evolution of displacements in the plane is not associated with swelling (lateral deflection).

It is assumed that the layer on which the film directly rests is isotropic and linearly viscoelastic. According to the theory of viscoelasticity [45], the stress-strain relation is written in the integral form.

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta}(t) = & 2 \int_{-\infty}^t \mu(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon_{\alpha\beta}(\tau)}{\partial \tau} d\tau + \\ & + \delta_{\alpha\beta} \int_{-\infty}^t \lambda(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon_{\gamma\gamma}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

where  $\mu(t)$  and  $\lambda(t)$  – the viscoelastic relaxation modules  $\delta_{\alpha\beta}$  – the Kronecker symbol. The  $\alpha\beta\gamma$  indices take values 1 and 2; repetition of the index in (5) means the summation over 1 and 2. Under the assumption that there is no external force, neglecting the inertia of quasi-static deformation, the equilibrium condition can be written in the form [37]:

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} = 0. \quad (6)$$

For small deformations, the strain - displacement relation takes the form:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right). \quad (7)$$

The viscoelastic layer is not loaded at the initial moment of time ( $t = 0$ ) and undergoes normal and shear displacements on its upper surface at  $t > 0$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= S_3(x_1, x_2, t) \text{ and } \sigma_{3,\alpha} + \\ &= S_\alpha(x_1, x_2, t) \quad \text{at } x_3 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

There are no displacements on the bottom surface of this layer:

$$u_\alpha = u_3 = 0 \quad \text{at } x_3 = -H. \quad (9)$$

In the general case, the surface of the viscoelastic layer undergoes both in-plane and out-of-plane displacements, which are interconnected with each other and only in two special cases they may not have a connection. In the first case, when the viscoelastic layer has a very large thickness ( $kH \rightarrow \infty$ ) and is incompressible ( $\nu = 0.5$ ). This case is considered in detail in [37]. In the second case, when this layer is very thin ( $kH \rightarrow 0$ ); it is this case that is most typical for paints and varnishes (PVC) and will be described in detail below.

For the relaxation modulus  $\mu(t)$ , the Kelvin model of linear viscoelasticity will be used, which is a mechanical analogue of a device consisting of a spring and a parallel acting shock absorber

$$\mu(t) = \mu_\infty + \eta \cdot \delta(t), \quad (10)$$

where  $\mu_\infty$  – the stiffness of the spring, representing the elastic shear modulus with the rubberized limit position;  $\eta$  – viscosity.

The interface between elastic and viscoelastic layers is maintained at each deformation. Consequently, the displacements and their traces remain continuous at the interface that connects the equations of equilibrium of the

elastic layer with the time-dependent responses of the viscoelastic layer, which leads to the equations:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \cdot \frac{H}{\eta} \left( -D_f \frac{\partial^4 w}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha \partial x_\beta \partial x_\beta} \right. \\ &\quad \left. + N_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 w}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} + \frac{\partial N_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} \cdot \frac{\partial w}{\partial x_\alpha} \right) - \frac{\mu_\infty}{\eta} w \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial t} = \frac{H}{\eta} \cdot \frac{\partial N_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} - \frac{\mu_\infty}{\eta} u_\alpha, \quad (12)$$

Where

$$\begin{aligned} D_f &= \frac{E_f h^3}{12(1-\nu_f^2)}, \quad N_{\alpha\beta} = \sigma_0 h_f \delta_{\alpha\beta} + \\ &+ \frac{E_f h_f}{1-\nu_f^2} [(1-\nu_f) \varepsilon_{\alpha\beta} + \nu_f \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}] \end{aligned} \quad (13)$$

Equations (11) and (12) are interrelated nonlinear evolution equations that can be solved numerically by simulating three-dimensional deformations of an elastic - viscoelastic bilayer and the evolution of the resulting two-dimensional corrugated patterns. For simplicity, we will analyze in detail only the deformations from in-plane compression (tension) and one-dimensional corrugations. Equations (11) – (12) in this case take the form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \cdot \frac{H}{\eta} \left( -D_f \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \right. \\ &\quad \left. + N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial N}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\mu_\infty}{\eta} w, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{\eta} \cdot \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\mu_\infty}{\eta} u, \quad (15)$$

where

$$N = \sigma_0 h_f + \frac{E_f h_f}{1-\nu_f^2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Substituting (4) into (14) and leaving only the leading terms containing the small parameter  $A(t)$ , we obtain the equation:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\alpha E_f - \mu_\infty}{\eta} A(t), \quad (17)$$

Where

$$\alpha = \frac{(1-2\nu)k^2 H h_f}{24(1-\nu)(1-\nu_f^2)} \left[ -k^2 h_f^2 - \frac{12(1-\nu_f^2)\sigma_0}{E_f} \right] \quad (18)$$

The solution to equation (17) is represented in the form

$$A(t) = A_0 \exp\left(s \cdot \frac{t}{\tau}\right), \quad (19)$$

where  $A_0$  is the initial amplitude of the disturbance;  $\tau = \eta/E_f$  is the characteristic time scale and  $s = \alpha - \mu_\infty/E_f$  is the dimensionless growth order of the disturbance. The stability of the bilayer depends on the sign of the parameter  $s$ . If  $s < 0$  for all wave numbers  $k$ , then the bilayer is stable and remains flat. Otherwise, when  $s > 0$  for any admissible wave-numbers, the bilayer is unstable and the disturbances grow, forming corrugations. In this case, the amplitude grows exponentially with time in the initial stage. As shown in [37], the initial stage of growth can be non-exponential if the viscoelastic layer has a finite elastic modulus in the glassy state (elastic limit as  $t \rightarrow 0$ ).

The growth order of  $s$  depends on the disturbance wavelength ( $L = 2\pi/k$ ) for various ratios  $\mu_\infty/E_f$ . In the limiting case, when  $\mu_\infty = 0$ , we have  $s = \alpha$  and  $s > 0$  (taking into account  $\sigma_0 < 0$ ) throughout the entire length of the disturbance waves. Therefore, for  $s > 0$ , the bilayer will be unstable. The critical value of the wavelength corresponding to  $s \rightarrow +0$  is

$$L_c = \pi h_f \sqrt{-\frac{E_f}{3(1-\nu_f^2)\sigma_0}}, \quad (20)$$

which coincides with the critical length of the Euler bend. The growth order is positive for  $L > L_c$  and has a peak at the wavelength

$$L_m = \pi h_f \sqrt{-\frac{2E_f}{3(1-\nu_f^2)\sigma_0}}. \quad (21)$$

As the ratio  $\mu_\infty/E_f$  increases, the value of  $s$  decreases without changing the shape of the dependence on the normal wavelength  $L/h_f$ . As a result, we obtain the second critical value of the wavelength determined by formula (21). The growth order of  $s$  remains positive when  $L$  changes in the interval between these two critical values. On the other hand, the fastest growth of the wavelength does not change, but the corresponding order of growth of  $s$  drops to zero when the value of  $L$  approaches the boundaries of this interval from the inside at the critical value of the ratio  $\mu_\infty/E_f$  corresponding to the equality  $s = +0$ :

$$\left(\frac{\mu_\infty}{E_f}\right)_c = \frac{3(1-\nu_f^2)(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \frac{H}{h_f} \left(\frac{\sigma_0}{E_f}\right)^2, \quad (22)$$

whence we find the critical value  $\sigma_0^c$  of the compressive stress, below which the bilayer becomes stable:

$$\sigma_0^c = E_f \left( \alpha \frac{h_f}{H} \frac{2(1-\nu)}{3(1-\nu_f^2)(1-2\nu)} \right)^{1/2} \quad (23)$$

The bilayer becomes stable when  $\mu_\infty/E_f$  is greater than the critical value (22). According to the criticality condition (22), the stability of an elastic – viscoelastic bilayer depends on the elasticity modulus (i.e., on the extended limit of the relaxation modulus  $\mu_\infty$ ) of the viscoelastic layer but does not depend on the initial modulus (i.e., on the glassy state). In other words, despite the initial high viscosity

or even stiffness of the viscoelastic layer, the bilayer "foresees" the subsequent softening of the layer and becomes spontaneously unstable. The time scale of the corrugation growth is proportional to the viscosity, and the order of growth increases with decreasing elasticity modulus. The wavelength of the fastest growing mode, however, does not depend on the viscoelastic layer, as follows from (21). As shown in [37], the wavelength of the rapidly growing growth is weakly dependent on the thickness ratio  $H/h_f$  and Poisson's ratio. The approximation using a thin layer leads to good accuracy in determining the wavelength but underestimates the order of growth of the fast-growing mode when the thickness ratio  $H/h_f$  is greater than 2.

Setting  $\partial/\partial t = 0$  in equations (14) and (15), we obtain two coupled nonlinear ordinary differential equations, each of which can be solved in the case of an equilibrium state. First of all, we note that the equilibrium amplitude of a sinusoidal corrugation with a wave number  $k$  is given by the expression

$$A_{eq} = \frac{2\sqrt{1-\nu_f^2}}{k} \left[ -\frac{\sigma_0}{E_f} - \frac{(kh_f)^2}{12(1-\nu_f^2)} - \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \frac{\mu_\infty}{E_f} \frac{1}{k^2 H h_f} \right]^{1/2} \quad (24)$$

which is valid only if the bilayer is unstable and there is a nonzero real-valued equilibrium amplitude of the corrugation. Moreover, minimizing the elastic stress energy in the bilayer with respect to the wavenumber leads to the next equilibrium corrugation wavelength:

$$L_{eq} = \pi h_f \left[ \frac{2(1-2\nu)}{3(1-\nu)(1-\nu_f^2)} \frac{E_f}{\mu_\infty} \frac{H}{h_f} \right]^{1/4} \quad (25)$$

Comparing (25) with the fastest growing wavelength (21), it can be noted that they can be completely independent. The fastest growing wavelength, which dominates the initial growth, is determined by kinetics and depends on the compressive stress  $\sigma_0$  in the elastic layer but does not depend on the viscoelastic layer. The equilibrium wavelength, on the contrary, is determined by energy and depends on the thickness and elastic modulus of the viscoelastic layer but does not depend on the stress in the elastic layer. This independence makes it possible to simultaneously determine the residual stress  $\sigma_0$  and the modulus of elasticity  $\mu_\infty$  from the initial and final corrugation wavelengths, respectively.

Indeed, from the kinetics of the process, we find by formula (23) the critical value  $\sigma_0 = \sigma_0^c$ , below which the bilayer is stable. Substituting  $\sigma_0 = \sigma_0^c$  into (21) and equating the right-hand sides of expressions (21) and (25), we find

$$\mu_\infty = \frac{3(1-\nu_f^2)(1-2\nu)}{2(1-2\nu)} \frac{(\sigma_0^c)^2}{E_f} \frac{H}{h_f}. \quad (26)$$

In a state of equilibrium, the shear displacement on the surface is close to zero, and the lateral displacement is approximately described by the formula

$$u = \frac{1}{8} k A_{eq}^2 \sin(2kx), \quad (27)$$

where  $k = 2\pi/L_{eq}$ . Thus, the in-plane displacement wavelength is equal to half the corrugation wavelength at equilibrium.

When the "film-substrate" system is cooled, the surface layer of the polymer coating is cured, which is accompanied by its shrinkage information. In this case, tensile internal stresses develop in the cured layer, which generate deformations of the interface

when the system is loaded. In this case, the distribution of stresses and strains at the interface "surface layer - substrate" appears in the form of modes of the "chess-board" or "herring bone" type [39].

These modes were considered in [39] based on the analysis of classical bends of a rigid substrate using a linearized analysis of stability.

Let  $E, \nu, \alpha$  and  $E_s, \nu_s, \alpha_s$  – Young's modulus, Poisson's ratio and thermal expansion coefficient of the film and substrate, respectively;  $t$ -film thickness. Let us assume that the substrate is much thicker than  $t$  and creates in-plane stresses in the film. Further, it is assumed that during the deposition of the film on the substrate, both of them have a temperature  $T_D$  and after deposition the temperature of the system will change by  $\Delta T$ . In addition, the film is considered elastic and initially free of deformation. Then the compressive axially symmetric in two directions stress of the film will be

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = -\sigma_0 = -[E/(1-\nu)] \int_{T_D-\Delta T}^{T_D} \Delta \alpha dT, \quad (28)$$

where  $\Delta \alpha = \alpha_s - \alpha$ . Consider the case  $\Delta \alpha > 0$  and  $\sigma_0 > 0$ .

According to the theory of Karman plates [44], the deflection of the film from the plane (deflection)  $w$  satisfies the equations:

$$D\nabla^4 w - (N_{11}w_{,11} + N_{22}w_{,22} + 2N_{12}w_{,12}) = -p \quad (29)$$

$$\frac{1}{Et}\nabla^4 F = w_{,12}^2 - w_{,11}w_{,22}. \quad (30)$$

Here,  $\nabla^4$  – a biharmonic operator;  $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$  - bending stiffness of the plate;  $w$ -offset perpendicular to the plane ( $x_1, x_2$ );  $p$  – a component of stress, acting per-

pendicular to the plate under the influence of the substrate;  $(w)_{,\alpha} \equiv \partial(w)/\partial x_\alpha$ ;  $N_{\alpha\beta} = \int \sigma_{\alpha\beta} dx_3$  – the resultant force acting in the plane of the plate;  $F$  – Airy stress, for which  $N_{11} = F_{,22}, N_{22} = F_{,11}, N_{12} = -F_{,12}$ . Equality (29) represents the equilibrium moment equation, and (30) the compatibility equation ensuring the existence of the gradient shift in the plane,  $u_{\alpha\beta}$ . We will neglect the tangent components of the traces that appear on the plate under the action of the substrate. This is a standard approximation for the analysis of corrugation of a thin film under the influence of a substrate [46], the accuracy of which can be verified by detailed analysis of one-dimensional modes. The average surface stress associated with plate displacements is represented as

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha}) + \frac{1}{2}w_{,\alpha}w_{,\beta};$$

$$N_{\alpha\beta} = [E/(1-\nu^2)] x$$

$$x((1-\nu)E_{\alpha\beta} + \nu E_{YY}\delta_{\alpha\beta});$$

$$M_{\alpha\beta} = D((1-\nu)w_{,\alpha\beta} + \nu \cdot w_{,YY}\delta_{\alpha\beta}) -$$

non-adjustable ratios representing the moment of the bend tensor.

In the absence of bends, the film has a state of uniform stress, determined by the equalities  $N_{11} = N_{22} = -\sigma_0 t, N_{12} = 0$ . The classical bend analysis based on linearization of equations (29) and (30) leads to the equations

$$D\nabla^4 w + \sigma_0 t \nabla^2 w = -p \quad (31)$$

$$\nabla^4 \Delta F = 0, \quad (32)$$

$F = -\frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)\sigma_0 t + \Delta F$ . The system of equations (31) - (32) has periodic solutions

$$w = \hat{w} \cos(k_1 x_1) \cos(k_2 x_2),$$

$$p = \hat{p} \cos(k_1 x_1) \cos(k_2 x_2), \quad (33)$$

at which equation (31) takes the form

$$(D \cdot k^4 - \sigma_0 t k^2) \hat{w} = -\hat{p}, \quad (34)$$

where  $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ .

For an infinitely deep substrate under normal load  $p$  in (29), provided that there are no tangent traces on the surface, the exact solution for the normal deviation,  $\delta$ , has the form

$$\delta = \hat{\delta} \cos(k_1 x_1) \cos(k_2 x_2), \quad (35)$$

where  $\hat{\delta} = 2\hat{p}/(\bar{E}_s k)$   $c$   $\bar{E}_s = E_s/(1 - \nu_s^2)$ .

The effect of the boundary conditions on the displacements along the tangential directions to the substrate surface is insignificant and therefore neglected. Under the condition  $\hat{w} = \hat{\delta}$  from equation (34) and  $\hat{\delta} = 2\hat{p}/(\bar{E}_s k)$  we obtain the equation for the eigenvalues  $k$ :

$$\sigma_0 t = D k^2 + \bar{E}_s / 2k \quad (36)$$

The critical value of the bending stress,  $\sigma_0^c$ , which is the minimum over  $k$  of equation (36), attained at

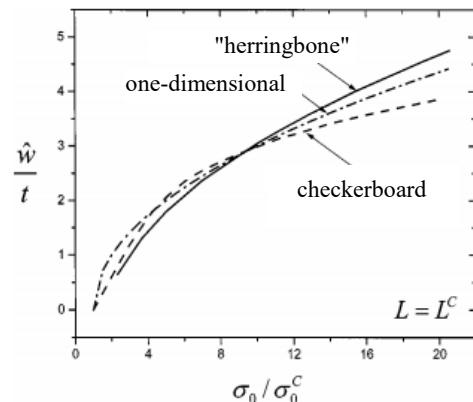
$$k^c \cdot t = (3\bar{E}_s/\bar{E})^{1/3}, \quad (37)$$

defined by the expression

$$\sigma_0^c = \frac{1}{4} \bar{E} (3\bar{E}_s/\bar{E})^{2/3}, \quad (38)$$

where  $\bar{E} = E/(1 - \nu^2)$ .

The right-hand sides of formulas (3) and (38) coincide. However, formula (38) was obtained for the residual stress  $\sigma_0$  in the initial state of the film and, moreover,  $\sigma_0$  can be much larger than the critical value  $\sigma_0^c$  (see Fig. 2).



**Figure 2** – The dependence of the bending amplitude of a thin layer,  $\hat{w}_1/t$ , is considered as a function of  $\sigma_0/\sigma_0^c$  for three modes. The wavelength (and slope in the case of the herringbone pattern) corresponds to its critical value at the onset of bending deformation.

Equality (38) is valid for a one-dimensional stress that causes corrugation with plane tension. This fact is well known [46]. In the case of a biaxially symmetric stress, the critical stress is applicable only for a one-dimensional mode with  $k_1 = k^2$  and  $k_2 = 0$ , but for any mode the wavenumbers must satisfy the equality

$$\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \cdot t = k^c \cdot t = (3\bar{E}_s/\bar{E})^{1/3}. \quad (39)$$

As shown in [39], nonlinear tensile displacements of the substrate essentially do not affect the behavior of the film. It is believed that the substrate has a very large thickness  $d$ , comparable to the wavelength of the mode, and on its lower surface the normal and tangential displacements are zero. It is assumed that the difference between the thermal expansion coefficients of the film and the substrate is  $\Delta\alpha$ , and the difference between their temperatures in the initial unloaded state is  $\Delta T$ .

The biaxial compressive stress in an unbent film will therefore be equal to  $\sigma_0 = E\Delta\alpha\Delta T/(1 - \nu)$  if the substrate is very thick.

Let us consider square modes of the "checkerboard" type ("check board mode" in the terminology of [39]) with a wavelength  $L$  in the  $x_1$  and  $x_2$  directions, determined by the critical condition (37);

$2\pi/k_1 = 2\pi/k_2 = L = \sqrt{2} \cdot L^c$ ,  $L^c = 2\pi/k^c C$ . The "checkerboard" cell in this case is a rectangular parallelepiped of dimension  $L \times L \times d$ .

A very small initial deformation, predetermined by the fact that the uncompressed system at  $\Delta T = 0$  has a weak average surface deviation, is written in the form

$$w = \hat{w}_l \cos(k_1 x_1) \cos(k_2 x_2), \quad (40)$$

where  $\hat{w}_l/t = 0,02$ .

The periodicity conditions applied to a cell as a result of all five nodal degrees of freedom are the same on both sides of the cell parallel to the  $x_1$  axis and similarly for the  $x_2$  axis. In addition, at each corner of the cell, the conditions  $\partial w / \partial x_1 = 0$  and  $\partial w / \partial x_2 = 0$  lead to the fact that the rises alternate with dips on the sides of the cell.

Modes of the "checkerboard" type are indeed determined by deviations along the normal, approximately described by the equations

$$w = \hat{w} \cos(k_1 x_1) \cos(k_2 x_2) \quad (41)$$

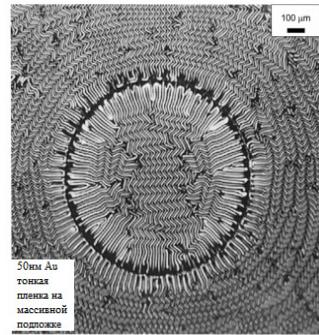
The numerical relationship between the amplitude of the mode,  $\hat{w}/t$ , defined as the half-difference between the maximum and minimum deviations, and the ratio  $\sigma_0/\sigma_0^c$  is illustrated in Fig. 2 [39].

Fig. 2 shows that the deviations of the one-dimensional mode lie between the deviations of the "checkerboard" and "herringbone" modes.

As shown in [39], the minimum of the configuration energy is attained at  $L/L^c \cong 1$ ,

and under this condition, the deflection along the normal has a herringbone mode.

A typical image of such a mode is shown in Fig. 3 [39].



**Figure 3** – A gold thin film on a substrate having a pattern with a circular flat depression a few millimeters in diameter. A herringbone pattern appears in the center of the cell outside the edge of the spot.

### Nonlinear waves of localized plastic flow

The clearest physical meaning of the "checkerboard" distribution of stresses and strains in a thin film was obtained in [47], where the theoretical substantiation of the mechanism of the interface between the film and the substrate was given for the first time.

According to the authors, the curing of the paint and varnish coating (PVC) leads to the formation of a kind of surface layer of the substrate in the form of a thin film lying on the substrate. This surface layer, according to the concept of physical mesomechanics, is an independent subsystem in a deformable (under the influence of external load) solid. The interface in the thin film-substrate system is of particular interest.

First, when a thin film is coupled to a substrate, a pronounced interface is formed, on which a geometrically correct "checkerboard" distribution of stresses and strains is realized, and the thickness of the film can be taken as the interface thickness in theoretical analysis.

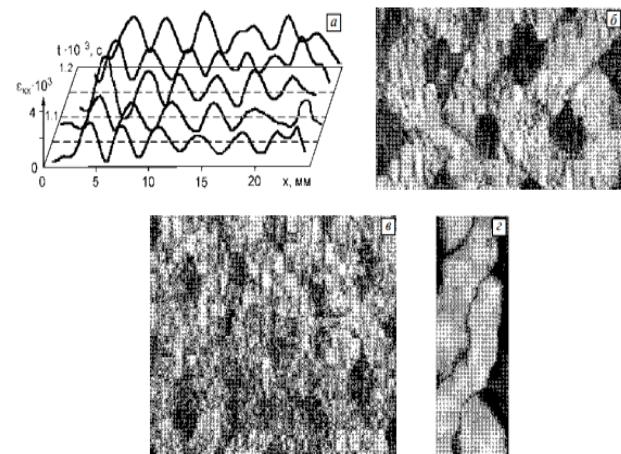
Second, a thin film is a highly nonequilibrium system. This is due both to its highly developed surface at a small volume and to a mismatch at the interface of the mating media (with different elastic moduli and thermal expansion). As a consequence, a nonequilibrium thin film in the initial state should have a cluster structure that will use structural-phase transitions in the fields of external influences of any nature [2]. A wide range of atomic configurations in the resulting surface layer causes the development of more intense plastic deformation in it than in the bulk of the crystal. The necessity of compatibility of the processes of plastic flow of the surface layer and the crystalline substrate causes the appearance of a quasiperiodic distribution of stresses and strains at the interface (their interface).

The analysis of theoretical and experimental studies carried out in [47] on the development of a localized plastic flow in the form of double spirals in nanostructured layers of a deformable solid led to the conclusion that the interface of dissimilar media in a two-dimensional dimension should have the form of a "checkerboard". Modeling the interface "surface layer-substrate" in a loaded solid, carried out in [48, 49, 29] on the basis of a stochastic approach in the framework of a three-dimensional model, confirmed the conclusion [47] about the "checkerboard" distribution of local stresses and strains when two dissimilar media are coupled.

Received theoretical confirmation and explanation of the channeling effect of local plastic flow in nanostructured surface layers along the cells of the "checkerboard" interface structure with tensile normal stresses.

Direct experimental confirmation of the "checkerboard" character of the distribution of stresses and strains at the interface "surface

layer-base crystal" was obtained in [50] on the example of an experimental study of alternating bending of flat samples of polycrystalline VT1-0 titanium with a hydrogenated surface layer. The "checkerboard" character of stress distribution at the interface "nanostructured surface layer - the main volume of material" provides the effect of plastic flow channeling and extrusion of the surface material in the form of double spirals of intertwining mesobands of localized deformation (Fig. 4 [51]). As a result, deformation defects reach the surface, rather than being pumped into the depth of the loaded sample. The latter retards the development of deformation macro-localization in the sample, causing a simultaneous increase in both the strength and plasticity of the material.



**Figure 4** – The experimental pictures of stationary corrugation of the surface layer in a deformable solid; tension at 293 K: a – a polycrystalline alloy Zr – 2.5% Nb; b, c, d – low-carbon St3; stretching at T=293K after ultrasonic treatment and subsequent annealing at T=1103K;  $\varepsilon=13$  (b), 28 (c), 32% (d); scanning electron microscopy, x250.

The cells of the "checkerboard" distribution of tensile and compressive normal stresses determine the corresponding cellular structure of the distribution of material in a thin film: the material from the cells of compressive normal

stresses is displaced into the cells of tensile normal stresses.

Mass transfer occurs in the field of shear stresses, which also have a "checkerboard" distribution at the interface but are phase-shifted by  $\pi/2$  in space.

**Stochastic approach to calculating internal stresses and strains.** Since the film is rigidly bound to the substrate, then under loading up to the beginning of fracture, both the film and the substrate should experience the same degree of deformation. Hence it follows that elastic stresses in the film  $\sigma_f$  are related to stresses in the substrate  $\sigma_s$  as follows

$$\sigma_f = \frac{1 - \nu_s^2 E_f}{1 - \nu_f^2 E_s} \sigma_s, \quad (42)$$

where  $E_f$ ,  $E_s$ ,  $\nu_f$  and  $\nu_s$  – Young's moduli and Poisson's ratios of the film and substrate material, respectively.

Due to the small grain size and high density of grain boundaries, dislocation plasticity in nanostructured films is limited. As a result, deformation develops at the mesoscale level under the conditions of a "checkerboard" stress distribution at the "film-substrate" interface, while the role of the maximum shear stresses, which determine the directions of shears in the deformed film, significantly increases.

Since plastic deformation can occur only in the region of tensile normal stresses [47, 51], when thin films are stretched, meso-bands of localized deformation develop, decorating the "checkerboard" structure of the interface.

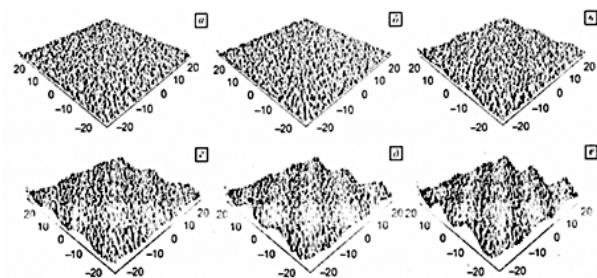
The conjugation of the modified surface layer and the substrate in a loaded solid causes two types of perturbations: nanoconfigurational perturbations of the atomic structure at the interface between two dissimi-

lar media, such as atomic clusters of different configurations, and a sinusoidal field of tensile and compressive elastic stresses in the surface layer due to the inequality of the elastic moduli of the surface layer and the substrate.

Self-organization of nanoconfigurational perturbations at the interface "modified surface layer - substrate" in a sinusoidal elastic field of change in tensile and compressive normal stresses in the surface layer causes a "checkerboard" distribution of stresses and inelastic deformations in the surface layer.

Figure 5 [52] shows the evolution of the "checkerboard" organization of atomic configurational perturbations at the interface "modified surface layer - substrate" in a three-dimensional elastic field of the surface layer with a sequential increase in the degree of deformation of the sample in the range 0.01...0.5%.

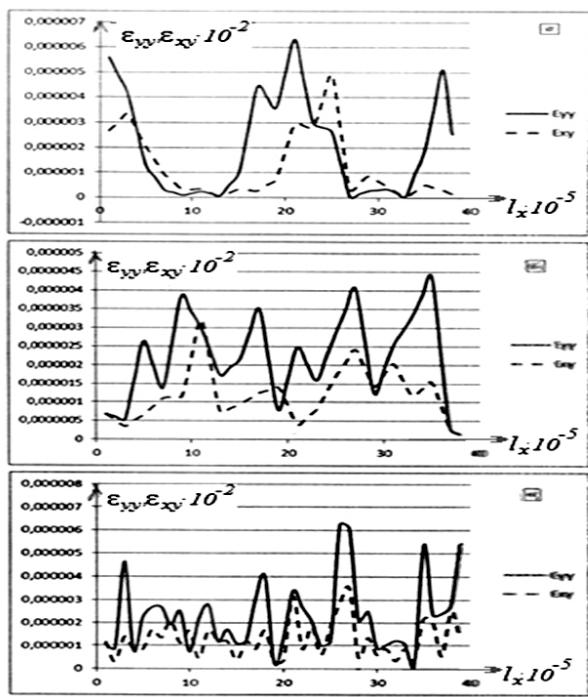
The dark areas in Fig.5 correspond to the zones of compressive normal stresses, and the light ones correspond to the zones of tensile stresses.



**Figure 5** – Pattern of inelastic deformation of the surface layer at different degrees of uniaxial tension of the sample:  $\varepsilon=0.01$  (a); 0.05 (b); 0.1 (c); 0.2 (d); 0.3 (e); 0.5% (e)

The need to interface the surface layer with a substrate that exhibits higher shear stability leads to corrugation of the surface layer. The character of this corrugation changes in stages as the degree of deformation increases.

Figure 6 [29] shows a pattern of corrugation of the surface layer of various thicknesses depending on the length  $l_x$  of the film section under consideration.



**Figure 6** – Profiles of normal  $\varepsilon_{yy}$  and tangential  $\varepsilon_{xy}$  deformation components depending on the length  $l_x$  at the interface thickness of  $10^{-6}$  (a),  $10^{-7}$  (b), and  $10^{-8}$  (c) m.

The normal  $\sigma(x_i)$  and tangential  $\tau(x_i)$  stress components at the point  $x_i$  of the simulated section of the film/substrate interface are represented by the following expressions:

$$\sigma(x_i) = (E_z(x_i) - \alpha T)E, \quad (43)$$

$$\tau(x_i) = (E_y(x_i) - \alpha T)G, \quad (44)$$

where  $x_i = i \cdot l_x/n$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  – the set of dividing points of the considered section  $[0, l_x]$  of the film;  $E$  and  $G$  – moduli of elasticity and shear of the substrate;  $T$  – temperature of the simulated section of the interface;  $\alpha$  is the coefficient of linear thermal expansion of the substrate material;  $E_z(x_i)$  and  $E_y(x_i)$  values at

$s = x_i$  of deformation diagrams  $E_z(s)$  and  $E_y(s)$ , which under symmetry conditions imposed on deformations at the boundaries of the deformable region

$$E_u(L) = E_u(-L), \quad u = x, y, z, \quad (45)$$

have the form:

$$\begin{aligned} E_x(s) &= 0; E_y(s) = L \left( \operatorname{sech} \frac{2s}{L} - 1 \right); \\ E_z(s) &= s - L \cdot \operatorname{tgh} \frac{2s}{L} \end{aligned} \quad (46)$$

and do not depend on time;  $\operatorname{thz}$  and  $\operatorname{sechz}$  – the hyperbolic tangent and secant functions:

$$\operatorname{thz} = (e^z - e^{-z})/(e^z + e^{-z}),$$

$$\operatorname{sechz} = 2/(e^z + e^{-z}).$$

Normal  $\varepsilon_{yy}(x_i)$  and tangential  $\varepsilon_{xy}(x_i)$  deformation profiles are determined by the formulas

$$\begin{aligned} \varepsilon_{yy}(x_i) &= E_z(s)|_{s=x_i}, \\ \varepsilon_{xy}(x_i) &= E_y(s)|_{s=x_i}. \end{aligned} \quad (47)$$

Based on the measured parameters, the level of internal stresses was calculated using formula (43).

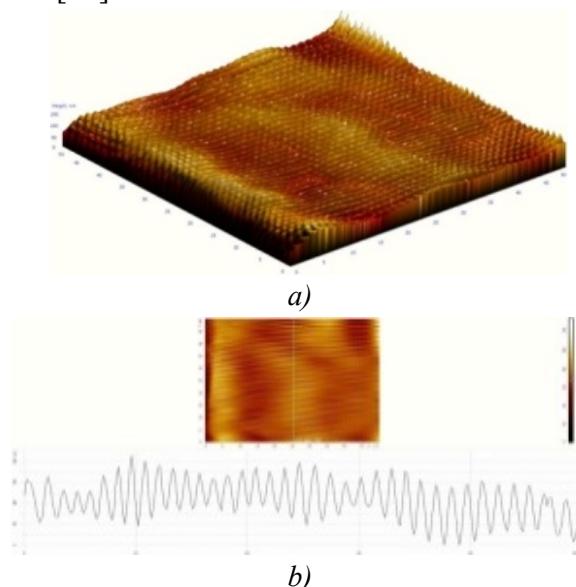
## Results and its discussion

The deflection of the steel console with PES coating was  $d = 285.47 \mu\text{m}$ . The results of measuring the film thickness before and after curing showed that the initial average thickness of the "wet" film was  $h_0 = 51.21 \mu\text{m}$ , and after curing  $h_1 = 47.06 \mu\text{m}$ .

The results of AFM studies of the micro-relief (profilograms) and volumetric topography of the surface of the PES film showed that the mean wavelength of the corrugation is  $\lambda = 1.25 \mu\text{m}$  with an amplitude of  $A = 96 \text{ nm}$

Since the total thickness of the coating ( $H = h_1 = 47.06 \mu\text{m}$ ) is more than 35 times the length of the RMR wavelength ( $\lambda = 1.25 \mu\text{m}$ ), it can be assumed that the thickness is much greater than the length  $h$  (Figure 7).

Considering the roughness profile in the framework of multifractal analysis, it can be noted that it has the property of invariance, when the same elementary geometric object (in our case, a straight cone) is continuously repeated over the entire area of the investigated area [35].



**Figure 7** – The volumetric topography (a) and average micro-profile (b) of the sample ( $50 \times 50 \mu\text{m}$ ) of polyester urethane varnish.

After measuring all the parameters using formulas (1), (2), and (43), the internal normal stresses in the PEUL film were calculated (Table).

**Table.** The values of the internal stresses of the PES film, determined by different methods

Method	Internal stress, MPa
Cantilevered [12]	2.921
Thickness difference [13]	2.431
RMR parameters measuring	2.626

As follows from the table, the internal stresses measured by all three methods are relatively the same and amount to about  $\sim 0.1E$ , the difference between the obtained values does not exceed  $\sim 20\%$ .

However, despite the fact that measurements of internal stresses by three methods give close values, the proposed method is much simpler than the other two in terms of convenience.

The advantage of this method is the ability to evaluate internal stresses in a polymer film solely by the geometric characteristics of the cured profile irregularities (wavelength, amplitude, thickness), without the need to measure the "wet" coating thickness and regardless of the mechanical properties and dimensions of the substrate.

After curing the polymer film at low temperatures, the calculations assumed that the thickness  $h$  of the elastic film and the thickness  $H$  of the underlying viscoelastic layer are small values of the same order, forming a kind of surface layer of the bulk of the substrate, which we conditionally called a "thin film". The film thickness is taken as the thickness of the surface layer / substrate interface, which makes it possible to compare the results of experimental studies with models of physical mechanics of heterogeneous media.

Measurements of the parameters of the regular microrelief (RMR) of the film surface make it possible to describe the kinetics of film formation and growth and to estimate the total energy level of the film/substrate system with the calculation of the critical values of the amplitude and wavelength of nonlinear film vibrations at which their stability appears, providing certain steady-state, independent from time to time, the values of the amplitude and wavelength of oscillations with the corresponding

formed profile of deformations on the surface of the film.

The real conditions for curing the paintwork (PVC) are a random process. In this regard, the distribution of stresses and strains at the film / substrate interface is naturally modeled on the basis of a stochastic approach [49, 50]. The introduction of stochastics is due to the fact that, within the framework of this approach, the elements of the medium of the mesoscale level are considered, the physical parameters of which (such as temperature, pressure, elastic moduli) cannot be measured "absolutely accurately", as for objects of the macrocosm. At the micro level, their own laws operate, there it is impossible to unambiguously determine the parameters of physical objects, they can only be spoken of as interconnected random variables. It should be noted that the mesoscale level is a connecting and directly determining link in the system of factors that affect the behavior of surfaces and interfaces of a deformable solid.

## Conclusion

It is shown that the contact of the cured coating with the elastic base can be considered as the interface of the surface layer in the form of a thin film of paintwork varnish with the bulk of the substrate material.

The loading of the substrate solid causes the distribution of stresses and strains on the outer surface of the film in the form of a "checkerboard" effect. As a result, deformation defects emerge on the surface and are not pumped into the depth of the loaded specimen, thereby retarding the development of deformation macro-location in the specimen, causing a simultaneous increase in the strength and plasticity of the specimen material.

The proposed method for assessing internal stresses based on measuring the parameters of the regular microrelief (RMR) of the film surface makes it possible to describe the kinetics of film formation and determine the critical values of the main characteristics of vibrations, which can be used to reveal stability.

To calculate internal stresses and strains, a stochastic approach was used, which takes into account the peculiarities of the flow of the film / substrate interface at the meso- and microscale levels, caused by the uncontrollability of external conditions affecting the properties of the sample. The values of the shrinkage stresses of the polyester urethane coating, calculated by the proposed and cantilever methods, by the method of thickness difference, are relatively the same (the difference does not exceed ~20%) and are of the order of ~0.1E.

## REFERENCES

1. **Uglov A.A. i dr.** Adgezionnaya sposobnost plyonok. - M.: Radio i svyaz, 1987. S. 28-32 (in Russia).
2. **Panin V.E., Panin A.V., Sergeev V.P., Shugurov A.R.** Effekty skejlinga v strukturno-fazovoj samoorganizacii na interfejse «tonkaya plyonka – podlozhka» // Fizicheskaya mezomekhanika, 2007, t. 10. №3. S. 9-21 (in Russia).
3. **Lihua Jin, Atsushi Takei, John W. Hutchinson.** Mechanics of wrinkle/ridge transitions in thin film/substrate systems // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 81, August 2015, Pp. 22-40.
4. **Sanzharovskij A.T.** Metody opredeleniya mekhanicheskikh i adgezionnyh svojstv polimernyh pokrytij. M.: Nauka, 1974, s. 6 (in Russia).
5. **Suhareva L.A.** Dolgovechnost polimernyh pokrytij. – M.: Himiya, 1984. – 240 s. (in Russia).

6. **Epifanov G.I., Moma Y.A.** Fizicheskie osnovy konstruirovaniya i tekhnologii REA i EVA. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Sovetskoe radio, 1979, s. 85 (in Russia).
7. **Petrova A.P.** Termostojkie klei. M.: Himiya, 1977, s. 9 (in Russia).
8. **Tadmor Z., Gogos K.** Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov, M.: Himiya, 1984, 632 s. (in Russia).
9. **Sanzharovskij A.T.** Vnutrennie napryazheniya v pokrytiyah. Vysokomolekulyarnye soedineniya, t. 2, №11, 1960, s. 1698-1702. (in Russia).
10. Fizika tonkih plyonok. Pod red. G. Hassa. T. 1, per. s angl., M.: Mir, 1967, s. 245 (in Russia).
11. **Corcoran E.M.** Determining Stresses in Organic Coatings using Plate Beam Deflection // *Journal of Paint Technology*. Vol. 41, No. 538. November 1969.
12. GOST 13036-67 Laki i kraski. Metod opredeleniya vnutrennih napryazhenij v lakokrasochnyh pokrytiyah. (in Russia).
13. ASTM D6991-05: Standard Test Method for Measurements of Internal Stresses in Organic Coatings by Cantilever (Beam) Method. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, Pennsylvania, USA 19428-2959.
14. **Zinovjev V.E., Harlamov P.V.** Vliyanie mikrotreshchin, skrytyh defektov i ostatochnyh napryazhenij polimernogo kleevogo sloya na ego razrushenie // *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, № 12-1, s. 37-42 (in Russia).
15. **Pashaev A.M., Mekhtiev A.Sh., Nizamov T.I. i dr.** Uplotnitel'nyj kompaund. Patent AR I 20060022. (in Russia).
16. **Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S., Kashirskij Yu.V. i dr.** Marochnik stalej i splavov. 4-e izd., pererabot. i dop. – M.: 2014. 1216 s.: ill. (in Russia).
17. GOST 31993-2013 (ISO 2808:2007) Materialy lakokrasochnye. Opredelenie tolshchiny pokrytiya. (in Russia).
18. ASTM D4114-95. Standard Practice for Measurements of Wet-Film Thickness by Notch Gauges.
19. ASTM D1212-91 (2013). Standard Test Methods for Measurement of Wet Film Thickness of Organic Coatings
20. OST 1 02507-92 Samolety dozvukovye. Obshchie trebovaniya k kachestvu vnesnej poverhnosti (in Russia).
21. **Yakovlev A.D.** Himiya i tekhnologiya lakokrasochnyh pokrytij. S-Pb.: Himizdat, 2008. – 448 s., il. (in Russia).
22. **Rozenfeld I.L., Rubinshtejn F.I., Zhigalova K.A.** Zashchita metallov ot korrozii lakokrasochnymi pokrytiyami. M., Himiya, 1987 g., 224 s. (in Russia).
23. **Jan Genzer, Jan Groenewold.** Soft matter with hard skin: From skin wrinkles to templating and material characterization // *Soft Matter*, 2, 310–323 (2006)
24. **E. Cerdá, L. Mahadevan.** Geometry and Physics of Wrinkling // *Physical Review Letters* 90 (7), pp. 074302/1-074302/4 (2003)
25. **Richard Vendamme, Takuya Ohzono, Aiko Nakao, Masatsugu Shimomura, Toyoki Kunitake.** Synthesis and Micromechanical Properties of Flexible, Self-Supporting Polymer-SiO<sub>2</sub> Nanofilms // *Langmuir*, 23, 2792-2799 (2007)
26. **Volynskij A.L., Bakeev N.F.** Strukturnaya samoorganizaciya amorfnyh polimerov – M.: Fizmatlit, 2005, 230 s. (in Russia).
27. **Takashi Nishino, Akiko Nozawa, Masaru Kotera, and Katsuhiko Nakamae.** In situ observation of surface deformation of polyimide film // *Journal of the Society of Rheology, Japan*, 32, 4, 211-214 (2004)
28. Fizicheskaya mezomekhanika i komp'yuternoe konstruirovaniye materialov. Pod red. Panina V.E. T. 1, Novosibirsk: Nauka, 1995, 298 s. (in Russia).
29. **Pashaev A.M., Janahmadov A.Kh., Dyshin O.A.** Stohasticheskij podhod k resheniyu zadachi o deformacii granicy razdela v nagruzhennom tverdom tele // *Vestnik Azerbajdzhanskoy inzhenernoj akademii*, t. 9, №2, 2017, s. 34-47(in Russia).
30. **Xiaodong Li, Weijie Xu, Michael A. Sutton, and Michael Mello.** In Situ Nanoscale In-Plane Deformation Studies of Ultrathin Polymeric Films During Tensile Deformation Using Atomic Force Microscopy and Digital Image Correlation Techniques // *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 6, 1, 4-12 (2007)
31. Mashinostroenie. Enciklopedicheskij spravochnik pod red. Chudakova E.A. Razdel 1. Inzhenernye raschety v mashinostroenii. V 15-ti tt. T.1. Glavnoe nauchno-tehnicheskoe izd-vo mashinostroitel'noj lit-ry. M. 1947, s. 428 (in Russia).
32. **Leocmach M., Nespolous M., Manneville S., Gibaud T.** Hierarchical wrinkling in a confined permeable biogel. *Science Advances*, v.1(9), 2015.

33. **Shugurov A.R., Panin A.V.** Mekhanizmy periodicheskoy deformacii sistemy «plyonka-podlozhka» pod dejstviem szhimayushchih napryazhenij// *Fizicheskaya mezomehanika*, №12 (3), 2009 g., s. 23-32 (in Russia).
34. **Krauford F.** Berkleeckskij kurs fiziki. Tom 3. Volny. M.: *Nauka*, 1974, s. 315 (in Russia).
35. **Pashaev A.M., Janahmadov A.Kh.** Fraktal'nye podhody v mekhanike razrusheniya. – Baku: *Apostroff*, 2015, 440 s. (in Russia).
36. **S.H. Im., R. Huang**, Evolution of wrinkles in elastic-viscoelastic bilayer thin films // *J. Appl. Mech.*, v.72, pp. 955-962 (2005).
37. **R. Huang**. Kinetic wrinkling of an elastic film on a viscoelastic substrate // *J. Mech. Phys. Solid*, v.53, pp.63-89 (2005).
38. **J. Groenewold**, Wrinkling of Plate s Coupled With Soft Elastic Media // *Physica A.*, 298, pp.32-45 (2001).
39. **X. Chen and J.W. Hutchinson**, Herringbone Buckling Patterns of Compressed Thin Films on Compliant Substrates // *J.Appl. Mech.*, 71, pp. 597-603 (2004).
40. **Z.Y. Huang, W.Hong and Z. Suo**, Nonlinear Analysis of Wrinkles in Films on Soft Elastic Substrates // *J.Mech. Phys. Solids*, 53, pp.2101-2118 (2005).
41. **N. Shridhar, D.J. Srolovitz, and Z. Suo**, Kinetics of Buckling of a Compressed Film on a Viscous Substrate // *Appl. Phys. Lett.*, 78, pp.2482-2484 (2001).
42. **R. Huang and Z. Suo**, Wrinkling of an Elastic Film on a Viscous Layer // *J. Appl. Phys.* 91, pp.1135-1142 (2002).
43. **P.J. Yoo, and H.H. Lee**, Evolution of a Stress – Driven Pattern in Thin Bilayer Films: Spinodal Wrinkling // *Phys. Rev. Lett.* 91, 154502 (2003).
44. **S.P.Timoshenko, J.M.Gere**, Theory of Elastic Stability, Mc Graw – Hill, New York, 1961.
45. **R.M. Christinesen**. Theory of Viscoelasticity: An Introduction. Academic Press, New-York, 1982.
46. **H.G. Allen**. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon, New-York, 1969.
47. **Panin A.V.** Nelinejnye volny lokalizovannogo plasticheskogo techeniya v nanostrukturirovannyh poverhnostnyh slayah tverdyh tel i tonkih plenkah. //*Fiz. mezomekh.* 2005. T.8. №3. S.5-17 (in Russia).
48. **Moiseenko D.D., Maksimov P.V., Solovyev I.A.** Stochasticeskij podhod k mnogourovnevomu modelirovaniyu vozmushchenij na granicah razdela v nagruzhennom tverdom tele //*Fiz. mezomekh.* 2004. T.7. №2. S.19-24 (in Russia).
49. **Moiseenko D.D., Maksimov P.V.** Raspredelenie napryazhenij i deformacij na interfejsse «poverhnostnyj sloj – podlozhka»: modelirovanie na osnove stohasticheskogo podhoda //*Fiz. mezomekh.* 2005. T.8. №6. s.89-96 (in Russia).
50. **Panin V.E., Panin A.V., Elsukova T.F., Kuzina O.Y.** Effekt «shahmatnoj doski» v raspredelenii napryazhenij i deformacij na interfejsah v nagruzhennom tverdom tele: Eksperimental'naya verifikasiya i mekhanizmy mezoskopicheskogo kanalirovaniya //*Fiz. Mezomekh.* 2005. T. 8. №6. S. 97-105 (in Russia).
51. **Panin V.E., Panin A.V.** Effekt poverhnostnogo sloya v deformiruemom tverdom tele // *Fiz. mezomekh.* 2005. T.8. №5. S.7-15 (in Russia).
52. **Panin V.E., Panin L.E.** Masshtabnye urovni gomeostaza v deformiruemom tverdom tele // *Fiz. mezomekh.* – 2004. –T.7 - №4. - S.5-24 (in Russia).

Received: 20.11.2020  
Revised: 12.06.2021  
Accepted: 20.06.2021

## Assessment of Thermal Potential in Disc Brake of Transportation Unit

M.Y. Javadov<sup>1</sup>, B.V. Dolishniy<sup>2</sup>, V.S. Skrypnyk<sup>2</sup>, D.Y. Zhuravlev<sup>2</sup>,  
M.M. Nasirova<sup>3</sup>, N.A. Volchenko<sup>4</sup>, L.B. Malyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

<sup>3</sup> National Aviation Academy of Azerbaijan (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

<sup>4</sup> Kuban State Technological University (Moskovskaya st., 2, Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)

### For correspondence:

Nasirova Mahluga / e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

### Abstract

Potentials and their gradients are analyzed in mechanical, heat, chemical, electrical, magnetic fields arising during elektrothermomechanical interaction of friction pairs of disc-block tormos of vehicles. Influence of diffusion and adsorption potentials on formation of double electric layers on friction belts of solid disks during braking is shown. The effect of local thermal potential on the friction layer of the solid brake disc is considered from the point of view of obtaining excessive entropy. Stable state of elementary volume of disk friction belt layer is estimated through local functionals, which take into account fluctuation of its energy load.

**Keywords:** paint and varnish coating, substrate, regular microrelief, shrinkage, shrinkage stress, internal stress, curing, polyester urethane varnish, thin film.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_27\_39

### For citation:

Javadov M.Y., Dolishniy B.V., Skrypnyk V.S., Zhuravlev D.Y., Nasirova M.M., Volchenko N.A., Malyk L.B.  
[Assessment of Thermal Potential in Disc Brake of Transportation Unit]  
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2021. Vol. 13, № 2. Pp. 27–39 (in Russian).

## Nəqliyyat vasitələrinin bütöv diskində termiki potensialın qiymətləndirilməsi məsələsi

M.Y. Cavadov<sup>1</sup>, B.V. Dolişniy<sup>2</sup>, V.S. Skripnik<sup>2</sup>, D.Y. Juravlyov<sup>2</sup>,  
M.M. Nəsirova<sup>3</sup>, N.A. Volčenko<sup>4</sup>, L.B. Malik<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk Neft və Qaz Milli Texniki Universiteti (Karpatska 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

<sup>3</sup> Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr., 30, Bakı şəh., AZ1010, Azərbaycan)

<sup>4</sup> Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

### Yazışma üçün:

Nəsirova Məhluqə / e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

### **Annotasiya**

Nəqliyyat vasitələrinin diskli-kündəli əyləclərinin sürtünmə cütünün elektrotermomexaniki qarşılıqlı təsiri zamanı yaranan (əmələ gələn) mexaniki, istilik, kimyəvi, elektrik, maqnit sahələrindəki potensiallar və onların qradientləri təhlil olunub. Əyləc prosesi zamanı bütöv disklərin sürtünmə yolunda ikili elektrik qatın formalaşmasına difuziya və adsorbsiya potensialının təsiri göstərilib. Lokal termiki potensialın bütöv əyləc diskinin sürtünmə qatına təsiri izafə entropianın əldə edilməsi baxımından nəzərdən keçirilib. Diskin sürtünmə yolunun elementar həcmının sabit vəziyyəti, enerji yüklenməsinin fluktasiyası nəzərə alınaraq lokal funksionallar vasitəsilə qiymətləndirilib.

**Açar sözlər:** diskli-kündəli əyləc, bütöv disk, sürtünmə cütü, sürtünmə yolu, potensial və onun qradienti, lokal termiki potensial.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_27\_39

УДК: 669.113.592.117

## Оценка термического потенциала в сплошном диске тормоза транспортного средства

М.Я. Джавадов<sup>1</sup>, Б.В. Долишний<sup>2</sup>, В.С. Скрипнык<sup>2</sup>, Д.Ю. Журавлев<sup>2</sup>,  
М.М. Насирова<sup>3</sup>, Н.А. Вольченко<sup>4</sup>, Л.Б. Малык<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

<sup>3</sup> Национальная академия авиации Азербайджана (Мардакянский пр., 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

<sup>4</sup> Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, д. 2, корп. А, Краснодар, 350072, Россия)

### Для переписки:

Насирова Махлуга /e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

### **Аннотация**

Проанализированы существующие методы определения внутренних (остаточных, усадочных) напряжений, возникающих при отверждении тонких пленок лакокрасочных покрытий (ЛКП), основанные на консольном изгибе подложки и разности толщин мокрого и сухого покрытия соответственно. Отмечена зависимость их точности от соотношения толщин пленки/подложка и однородности нанесённой пленки. Рассмотрено применение методов атомно-силовой микроскопии, основанных на измерении геометрии регулярного микрорельефа (РМР) поверхности пленки, служащего в качестве характерного проявления её усадочных деформаций. Расчет внутренних напряжений и деформаций проведен на основе стохастического подхода с учетом «шахматного» распределения деформационных дефектов на наружной поверхности пленки.

**Ключевые слова:** лакокрасочное покрытие, подложка, регулярный микрорельеф, усадка, усадочные напряжения, внутренние напряжения, отверждение, полизифируретановый лак, тонкая пленка.

## Введение

Пары трения тормозных устройств являются одним из основных узлов тормозных систем автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта. Детали пар трения тормозов должны обеспечивать безопасность перевозимых пассажиров и грузов, надежность и стабильность при длительных сроках эксплуатации, высокие трибологические характеристики материалов пар трения при динамической и тепловой нагруженности и не зависеть от температурных и погодных условий, обеспечивать малошумность и комфорт от процесса фрикционного взаимодействия пар трения тормозов и т. д. Перечисленные требования определяются комплексом физико-механических, а также трибологических характеристик материалов фрикционной пары.

Движущей силой в механическом, тепловом, химическом, электрическом и магнитном поле процессов, эффектов и явлений являются потенциалы их параметров.

## Анализ литературных источников и состояние проблемы

В работах [1, 2, 3] обращено внимание на действие потенциалов и их градиентов, которые наблюдались в механических, тепловых, химических, электрических, электромагнитных и других полях. Однако как потенциалы так и их градиенты рассматриваются отвлеченно и не привязанные к телам, которые применяются в дисково-колодочных тормозах. Короче говоря, требуется систематизировать потенциалы и их градиенты применительно к парам трения тормозных устройств.

Электрические явления на поверхностях раздела фаз рассмотрены в работе [4].

При этом отмечено, что вблизи поверхности раздела фаз образуется двойной слой зарядов: одна часть этого слоя локализована на плоскости поверхности, а вторая в виде диффузионного слоя распространяется вглубь раствора.

На микроуровне роль диффузии в процессах трения и износа значительно многообразней [5]. Предположение о возможности диффузии ионов металла высказывались давно. Растворение металла в полимерном материале было экспериментально обнаружено В. А. Белым. В результате этих исследований было установлено, что в адгезионных соединениях, содержащих по меньшей мере два разнородных металла, полимер обладает способностью проявлять свойства электролита при крекинг процессе его поверхностного слоя.

Кроме того предполагалось, что это связано с диффузией металловодержащих продуктов контактных реакций в полимерную подложку. При этом на подложке возникает электрическое напряжение. При замыкании во внешней цепи появляется ток, направление которого определяется величиной и знаком электрохимических потенциалов металлов, составляющих данную пару. Электрохимическое взаимодействие оказывает влияние на адгезионную прочность.

Диффузия в равномерно вращающихся системах представлена в работе [5]. В такой системе различные компоненты жидкости подвержены действию центробежной и кориолисовой сил, которые обусловлены вращением системы. Рассмотрено условие, когда диффузионные потоки и термодинамические силы одновременно равны нулю. Этот случай имеет практическое значение при определении количества жидкости

по седиментации в ультрацентрифуге. Здесь же приводится метод определения скорости седиментации жидкости между раствором и чистым растворителем. Предложенные методы можно использовать в системах охлаждения, заполненных наножидкостью, самовентилируемых дисках с шипами в дисково-колодочных тормозах транспортных средств.

**Цель работы** – обосновать возникновение потенциалов, действующих в полях пар трения тормозов и выделить роль локального термического потенциала в сплошном диске тормоза.

### Потенциалы – движущая сила процессов, эффектов и явлений

Чтобы выяснить смысл понятия потенциал, будем рассматривать каждый вид энергии как произведение двух величин:

- фактора интенсивности (интенсивного свойства);
- фактора емкости (экстенсивного свойства).

Так, механическая энергия определяется величиной  $fdl$ , т. е. произведением силы на приращение пути; электрическая —  $Edq$ , т.е. произведением э. д. с. на количество переносимого заряда; магнитная —  $Bdl$ , т.е. произведением магнитной индукции на намагниченность, «объемная» —  $PdV$ , поверхностная энергия —  $\sigma d\omega$ , т. е. произведением поверхностного натяжения на изменение площади поверхности, потенциальная —  $mgdh$ , кинетическая —  $(V^2/2)dm$  и т. д.; наконец, химическая —  $\mu dn^*$ . Факторы интенсивности нередко объединяют под общим названием обобщенных сил, а фактор емкости называют обобщенным путем. Так, в случае механической энергии величина силы является множителем напряже-

ния (так же, как  $P$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  и т. д. в соответствующих видах энергии), а величина пройденного пути, т. е. соответственно  $V$ ,  $\omega$ ,  $n$  и т. д. показывают, в какой степени проявляется действие силы.

Каждому виду энергии, возникающей при фрикционном взаимодействии пар трения тормозов соответствуют определенные потенциалы и их градиенты, которые зависят от темпов протекания процессов (см. рис. 1).

При этом между термодинамическими и энергетическими параметрами при их постоянных величинах существуют соотношения [6] (см. табл. 1).

В табл. 1 использованы следующие условные обозначения:  $\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$  – изобарный коэффициент расширения;  $\beta = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$  – изотермический коэффициент сжатия;  $c_p$ ,  $c_v$  – теплоемкость при постоянном давлении, объеме.

При электротермомеханическом трении в зонах фрикционного контакта происходит множество процессов, эффектов и явлений, которые пересекаются между собой, воздействующих на трибологические характеристики узлов трения. Но среди них имеются такие, которые влияют на несколько характеристик. В первую очередь, к такого рода явлению относится диффузия.

Влияние диффузии на процессы трения и износа можно рассматривать как на макро-, так и на микроуровне. Макроуровень определяет влияние диффузии на трибологические характеристики узла трения с позиций термодинамической системы открытого типа. Для последней возможно наличие режимов, в которых происходит отрицательный прирост энтропии и, следова-

тельно, снижение деструктивных процессов. Уменьшение энтропии и выход термодинамической системы на благоприятные режимы развития тем вероятнее, чем интенсивней будет происходить энергетический обмен с токами омывающей среды. Наиболее мощным каналом такого обмена (диссипации) является массоперенос, т. е. диффузия, способствующая терморозряду, а потом термовзрыву, т. е. глубинному пиролизу в полимерной накладке [7, 8]. Применительно к узлам трения это означает, что диффузия ускоряет переход трибосопряжения к трению с максимальными значениями динамического коэффициента трения и минимальным износом.

Диффузионный слой, имея внешний и внутренний слой, способствует формированию двойного электрического слоя. При этом первый, находящийся в растворе на твердой подложке накладки соответствует плотному или адсорбированному, а второй – диффузионному слою.

Подобно тому, как температура является движущей силой при возникающих потенциалах (см. рис. 1), а также в теплообменных процессах, так и химический потенциал является движущей силой при переходе массы.

Он приводит к установлению химического равновесия (и фазового, если передача массы происходит в гетерогенной системе, т. е. между фазами). Подобно другим факторам интенсивности (в соответствующих процессах), химический потенциал вещества по мере протекания процесса выравнивается и в момент наступления равновесия он становится одинаковым во всех существующих фазах, в которых находится данное вещество.

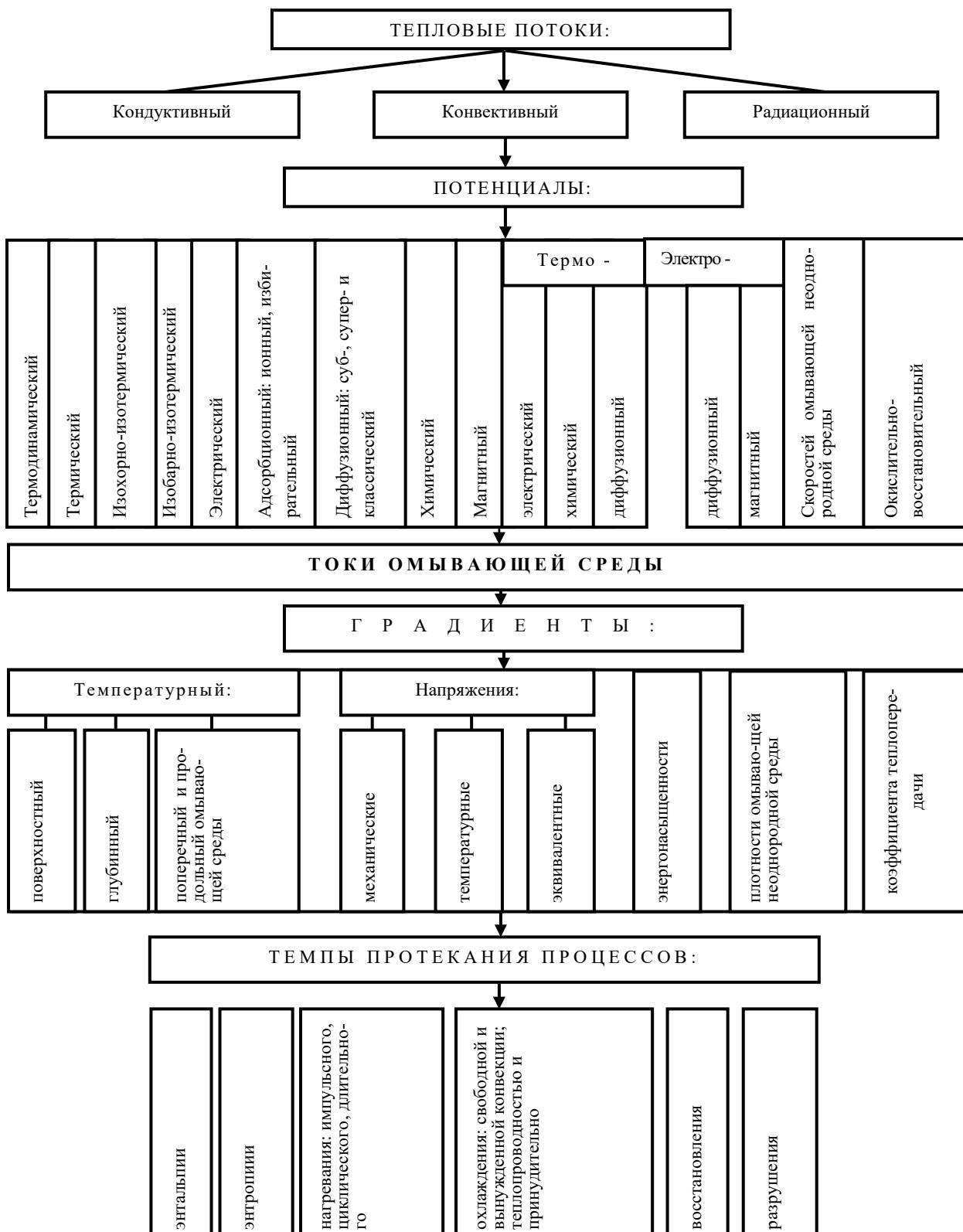
Таким образом, химической переменной является количество вещества. Избыток вещества как бы компенсирует меньшую силу его химического сродства. Под веществом подразумевается поверхностный слой накладки, находящийся при поверхностной температуре выше допустимой для его материалов.

В отличие от других факторов интенсивности, непосредственно измерить химический потенциал нельзя, что делает это понятие не таким наглядным, как удельные нагрузки, поверхностные, объемные и вспышки температуры и другие в металло-полимерных парах трения дисково-колодочного тормоза транспортного средства.

### Локальный термический потенциал в сплошном диске тормоза

Совместное действие излучения, теплопроводности, свободной и вынужденной конвекции с помощью неоднородной среды направлено на снижение энергонагруженности пар трения дисково-колодочных тормозов при их фрикционном взаимодействии в интервале времени между торможениями при движениями транспортного средства по полотну дороги.

Теплота подводится к полированным (пояса трения) и матовым поверхностям тормозного диска и к его телу посредством теплопроводности, а отводится она совместным действием свободной и вынужденной конвекции, а также излучением от указанных выше поверхностей. Природа перечисленных видов теплообменных процессов различная, и следовательно, эффективность охлаждения неодинаковая.



**Рисунок 1 - Иерархические энергетические уровни трибосопряжений**  
**Figure 1 - Hierarchical energy levels of tribocoupling**

**Таблица 1.** Соотношения между термодинамическими и энергетическими параметрами при их постоянных величинах

**Table 1.** Relationships between thermodynamic and energetic parameters at their constant values

Изменение:	$P=\text{const}$	$T=\text{const}$	$V=\text{const}$	$S=\text{const}$	$U=\text{const}$	$H=\text{const}$	$F=\text{const}$	$G=\text{const}$
давления (МПа)	$(\partial P)$	-	-1	$-\alpha V$	$-C_p/T$	$\alpha PV - C_p$	$-C_p$	$S + \alpha PV$
температуры (°C)	$(\partial T)$	1	-	$-\beta V$	$-\alpha V$	$(\beta P - \alpha T) - V$	$(1 - \alpha T)V$	$\beta PV$
объема ( $\text{м}^3/\text{моль}$ )	$(\partial V)$	$\alpha V$	$\beta V$	-	$C_v \beta V/T$	$C_v \beta V$	$(C_v \beta + \alpha V)V$	$-\beta SV$
энтропии Дж/(моль·°C)	$(\partial S)$	$C_p/T$	$\alpha V$	$-C_v \beta V/T$	-	$C_v \beta PV/T$	$C_p V/T$	$(C_v \beta P - \alpha TS)V/T$
теплоты	$(\partial Q)$	$C_p$	$\alpha TV_1$	$-\alpha V$	0	$-C_v \beta PV$	$C_p V$	$(C_v \beta P - \alpha TS)V$
работы системы	$(\partial A)$	$\alpha PV$	$\beta PV$	0	$C_v \beta PV/T$	$C_v \beta PV$	$(C_v \beta + \alpha V)PV$	$-\beta SPV$
внутренней энергии	$(\partial U)$	$C_p - \alpha PV$	$(\alpha T - \beta P)V$	$-\alpha V$	$-C_v \beta PV/T$	-	$(C_p - \alpha PV)V - C_v \beta PV$	$(\beta SP - \alpha TS + C_v \beta P)V$
энталпии	$(\partial H)$	$C_p$	$(\alpha T - 1)V$	$-(C_v \beta + \alpha V)V$	$C_p V/T$	$C_v \beta PV - (C_p - \alpha PV)V$	-	$(S + \alpha PV)x x(V - \alpha TV) + C_p \beta PV$
энергии Гельмгольца	$(\partial F)$	$-(S + \alpha PV)$	$-\beta PV$		Изохорно-изотермический потенциал			
				$\beta SV$	$(\alpha TS - C_v \beta P)V/T$	$(-C_v \beta P + \alpha TS - \beta SP)V$	$(S - \alpha PV)x x(\alpha TV - V) - C_p \beta PV$	$SV(\beta P - 1) - \alpha PV$
энергии Гиббса	$(\partial G)$	- $S$	- $V$	$(\beta S - \alpha V)V$	$(\alpha TS - C_p)V/T$	$V(\alpha PV - C_p) + (\alpha TV - \beta PV)S$	$(\alpha TS - C_p - S)V$	$SV(1 - \beta P) + \alpha PV^2$
Однаковая единица измерения, Дж/моль								-

На рис. 2 а, б, в проиллюстрирована имитационная схема вращения колеса легкового (а) и грузового (б) транспортного средства при фрикционном взаимодействии пар трения дисково-колодочного тормоза при различных коэффициентах взаимного перекрытия Квз и объемной температуре (в) на: 1, 2, 3 и 4-ом положении накладки на пояссе трения тормозного диска. Как видно из рис. 2 в движущей силой являлся градиент объемной температуры, т. е. ее разности:  $t1' - t1$ ;  $t2' - t1'$  и  $t3' - t2'$ .

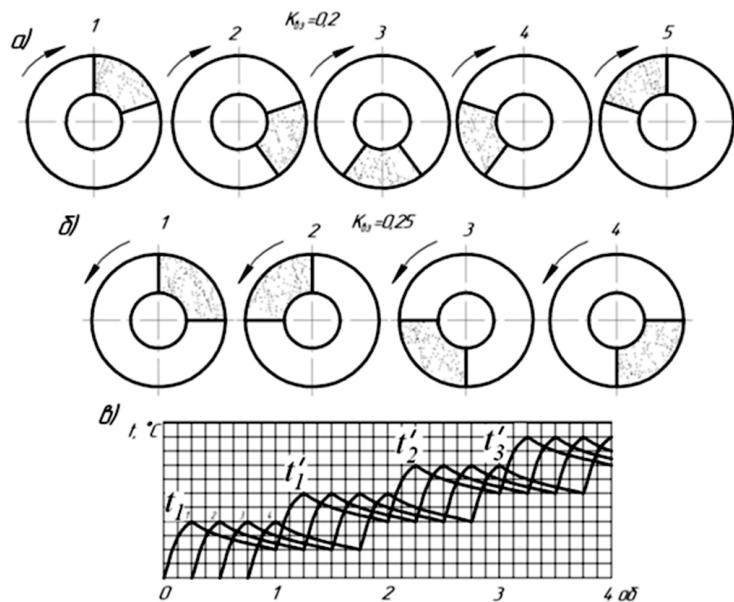
На рис. 3 а, б, в показано температурное поле сплошного тормозного диска при граничных условиях: а – несимметричных 3-го рода; б – разнородных; в – изолированного с одной стороны слоем воды;  $q$  –

удельный тепловой поток;  $t_i$  – температуры поверхностей диска;  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$ ,  $\rho$  – теплоемкость и плотность материала диска.

Слой воды на поверхности диска (рис. 3 в) экранирует лучистый теплообмен. Из рис. 3 а, б, в следует, что основную роль в доставке теплового потока от одной поверхности к другой принадлежит теплопроводности (кондуктивному теплообмену).

Рассмотрим уравнение баланса в слое пояссе трения диска при его фрикционном взаимодействии с рабочей поверхностью полимерной накладки

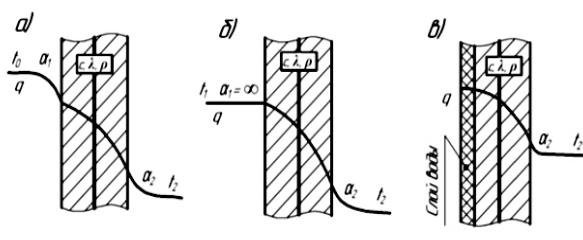
$$\rho \partial_t e = -q_{ij}, \quad (1)$$



**Рисунок 2 а, б, в** - Имитация вращения колеса при трением пары дисково-колодочного тормоза при различных коэффициентах взаимного перекрытия  $K_{vz}$  (а, б) и объемной температуре (в) на: 1, 2, 3 и 4-ом положении накладки на поясе трения тормозного диска

**Figure 2 a, b, c** - Simulation of wheel rotation at friction interaction of disc-shoe brake triangle pairs at different coefficients of mutual overlap  $K_{vz}$  (a, b) and volume temperature (c) on: 1, 2, 3 and 4-th position of lining on friction belt of brake disc

где  $\rho$  – плотность материала;  $e$  – внутренняя энергия на единицу массы материала;  $q_{ij}$  – тепловой поток, генерируемый в слое пояса трения диска при первом обороте колеса транспортного средства (рис. 3 а).



**Рисунок 3 а, б, в** - Температурное поле тормозного диска при граничных условиях: а – несимметричных 3-го рода; б – разнородных; в – изолированного с одной стороны слоем воды

**Figure 3 a, b, v** - Brake disc temperature field under boundary conditions: a - asymmetric of the 3rd kind; b - heterogeneous; c - insulated on one side water layer

Умножим обе части равенства (1) на  $\delta t^{-1}$  ( $\delta$  – символ варьирования объемной температурой  $t$ ) и проинтегрируем по всему объему слоя  $V$  пояса трения диска для фиксированных граничных условий получаем равенство

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e \delta V = \int q_j \delta t_j^{-1} dV \quad (2)$$

или с учетом закона Фурье ( $q = -\lambda \text{grad}t$ ) имеем

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e \delta V = \frac{1}{2} \int \lambda t^2 \delta(t_j^{-1})^2 dV, \quad (3)$$

Представим, что вблизи стабильного состояния элементарного объема  $dV$  слоя пояса трения диска, характеризуемого объемной температурой  $t_0(x_j)$ , имеем

$$\partial_t e = \partial_t \delta e \quad (4)$$

и если пренебречь членами более высокого порядка, то получаем

$$\lambda t^2 = \lambda_0 t_0^2 + \delta(\lambda t^2). \quad (5)$$

В свою очередь равенство (3) записываем в виде

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e dV = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 \delta(t_j^{-1})^2 dV + \frac{1}{2} \int \delta(\lambda t^2) \delta(t_j^{-1})^2 dV + \frac{1}{2} \int \delta(\lambda t_j^{-1})^2 dV. \quad (6)$$

Согласно [9, 10] левая часть (6) равна  $\frac{1}{2} \partial_t \delta^2 S$ . Следовательно, правая часть соответствует получению избыточной энтропии (S), поскольку пояс трения диска прошел путь второго оборота колеса транспортного средства (рис. 3 б). При этом полученная избыточная энтропия положительна, поскольку имеет место прирост тепловой энергии в слое пояса трения диска, за счет увеличения работы трения и удельных нагрузок во фрикционном узле.

### Определение стабильного термического состояния пояса трения сплошного диска тормоза

В окрестности стабильного состояния элементарного объема  $dV$  слоя пояса трения диска обе части (1) – величины первого порядка. Таким образом, уравнение (6) устанавливает взаимосвязь между величинами второго порядка и поэтому вторым членом в правой части (6) нельзя пренебречь по сравнению с первым. По той же причине знак одного первого члена не определяется условием устойчивости, поскольку темп нагревания слоя пояса трения диска не равен его темпу вынужденному воздушному охлаждению (см. рис. 4 а, б). Исследуем знак первого члена отдельно. Для этого введем следующее обозначение:

$$\Phi(t, t_0) = \int L(t, t_0) dV, \quad (7)$$

где подынтегральное выражение – лагранжиан ( $L$ )

$$\int \alpha(t, t_0) dV = \frac{1}{2} \lambda_0 t_0^2 (t_j^{-1})^2; \quad (8)$$

тогда первый член в (6) равен  $\delta\Phi$ . Величина  $\Phi$  является функционалом двух переменных: неварьируемой переменной  $t_0$  – предлагаемого решения (оно еще будет определено) – и переменной  $t$ , которая варьируется. Ниже будет показано, что  $t$  можно интерпретировать как флюктуирующее температурное распределение, среднее от которого равно  $t_0$ .

Исследуем теперь условие, при котором интеграл  $\Phi$  стабилен (экстремален) по отношению к вариациям  $t$ . Эта классическая задача вариационного исчисления [9,10]. Условие стабильности описывается равенством Эйлера – Лагранжа [7]:

$$\frac{\delta L}{\delta t^{-1}} = -\left(\lambda_0 t_0^2 t_j^{-1}\right)_j = 0. \quad (9)$$

При этом считаем, что решение  $t^+(x_j)$  того уравнения совпадает с предполагаемым решением  $t_0$ . Это *a posteriori* приводит к дополнительному условию:

$$t^+ = t_0, \quad (10)$$

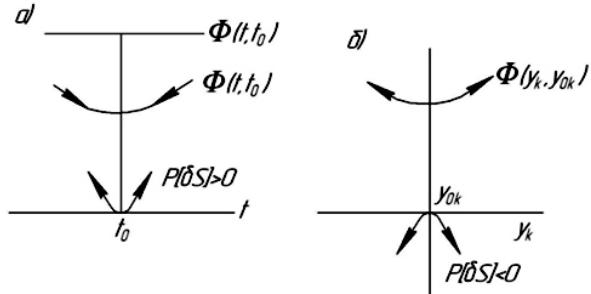
подставляя которое в (9), получаем экстремаль

$$\left( \frac{\delta L}{\delta t^{-1}} \right)_{t_0} = \left( \lambda_0 t_0^2 t_j^{-1} \right)_j = 0, \quad (11)$$

т. е. уравнение теплопроводности, отвечающее стабильному тепловому состоянию.

Таким образом, подынтегральное выражение (8) функционала ( $\Phi$ ) (7) можно интерпретировать как обобщенный лагранжиан. Исследуем природу этого экстремума. Для этого вычисляем  $\Phi(t, t_0)$  вблизи стабильного состояния элементарного объема  $dV$  слоя пояса трения диска получаем

$$\Delta\Phi = \Phi(t, t_0) - \Phi(t_0) = \\ = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 \left\{ \left[ [t_0^{-1} + \theta]_{,j} \right]^2 - \left[ [t_0^{-1}]_{,j} \right]^2 \right\} dV (\theta = t^{-1} - t_0^{-1}) \quad (12)$$



**Рисунок 4 а, б** - Локальный потенциал  $\Phi(t, t_0)$  и, функционал  $F(t, t_0)$  для устойчивого (а) и локальный потенциал  $\Phi(y_k, y_{0k})$  для неустойчивого (б) решения задачи теплопроводности:  $P[S]$  – образующаяся энтропия

**Figure 4 a, b** - Local potential  $\Phi(t, t_0)$  and, functional  $F(t, t_0)$  for stable (a) and local potential for unstable (b) solution of heat supply problem:  $P[S]$  - resulting entropy

Раскрывая скобки в правой части (12) и интегрируя по частям линейный по  $\theta$  (температурное возмущение вызванное перемещением пояса трения диска за третий оборот колеса транспортного средства) (рис. 2 в) члену, увидим, что этот член равен нулю благодаря (11). Следовательно вблизи стабильного состояния

$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 (\theta_{,j})^2 dV > 0. \quad (13)$$

Поэтому экстремум  $\Phi$  соответствует абсолютному минимуму. Функционалы, обладающие свойствами (11) и (13) называются локальными потенциалами (локальными по отношению к функции  $t_0$ ). С другой стороны, из (13) следует, что первый член в правой части (6) положителен.

Вообще функционал типа  $\Phi(y_k, y_{0k})$  от нескольких функций  $y_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) называют локальным потенциалом, если выполняются следующие условия:

- первого порядка для минимума  $\Phi$  по отношению к

$$y_k \delta\Phi = 0 \quad (14)$$

совместно с дополнительными

$$y_k^+ = y_{0k} \quad (15)$$

что не противоречат законам сохранения для  $y_k$ ;

- более высокого порядка

$$\Delta\Phi > 0 \quad (16)$$

для абсолютного минимума всегда выполнимо.

Отметим, что условие высокого порядка, менее жесткое, чем условие (16)

$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} \delta^2 \Phi > 0 \quad (17)$$

не подходит, так как пользоваться локальным потенциалом применительно к вариационному исчислению значит пользоваться пробными функциями, соответствующими произвольным отклонением неизвестного решения. Например, по определению функционал

$$F(t, t_0) = \int q_{0j} t_j^{-1} dV = \int \lambda_0 t_0^2 t_{0,j}^{-1} t_{,j}^{-1} dV \quad (18)$$

удовлетворяет первому, но не удовлетворяет второму условию и поэтому его нельзя рассматривать как локальный потенциал.

В самом деле, интегрирование по частям позволяет получить  $\Delta F = 0$  вблизи стабильного состояния, а не условие минимума (рис. 4 а).

Кроме того, в задаче теплопроводности знак  $\Delta\Phi$  в (10) совпадает со знаком (6), так как условие устойчивости здесь выполнено. Но этого уже не будет в задачах, допускающих неустойчивое решение. Такая ситуация представлена на рис. 4 б где функционалы изображены как обычные функции термического процесса. В устойчивом состоянии локальный потенциал всегда имеет

минимальное значение в случае полного прогрева или термостабилизационного состояния пояса трения диска, и поэтому любое его изменение приводит к положительной величине получаемой избыточной энтропии.

В данной задаче локальный потенциал далеко не единственный, и тем же способом, используя ранее рассмотренные множители, можно построить несколько лагранжианов. Например, в задаче теплопроводности, кроме лагранжиана (8), можно рассмотреть следующие выражения:

$$\frac{1}{2} \lambda_0 t_0 [(\ln t)_{,j}]^2 \text{ или } \frac{1}{2} \lambda_0 t_j^2 \quad (19)$$

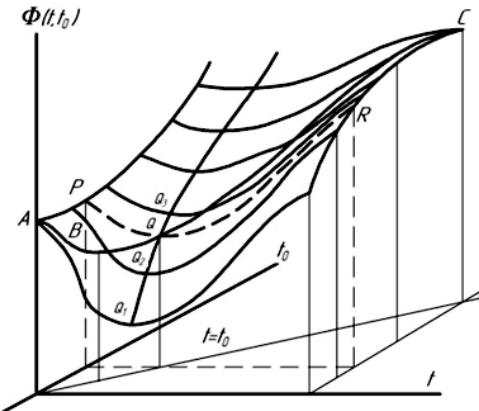
Для этого (1) надо умножить на  $t \delta t^{-1}$  или  $\delta t$ . Как правило, наиболее подходящий для практических целей локальный потенциал связан с характером термического закона. Например, в данном случае лагранжиан (8) более удобен, если  $\lambda_0 t_0^2$  почти не изменяется, тогда как второй лагранжиан (19) подходит для случая  $\lambda_0 = \text{const}$ .

Проанализируем вариационные уравнения (9) и (11). Как уже отмечалось характерной особенностью локального потенциала  $\Phi(t, t_0)$  (7) является то, что он зависит от двух функций  $t$  и  $t_0$ . Вместе с тем из выражения (8) следует, что

$$2\Phi(t, t_0) = P(t), \quad (20)$$

где правая часть означает получение энтропии  $P[S]$ . В частных случаях, когда  $\lambda \sim t^{-2}$  или когда  $\lambda$  и  $t$  можно считать константами (как в случае стабильных состояний),  $\Phi$  не зависит от  $t_0$ , а зависит только от  $t$  и тогда совпадает с получением энтропии  $P[S]$  [11].

Чтобы наглядно представить свойства функционала  $\Phi$  по отношению к функциям  $t$  и  $t_0$ , рассмотрим поведение одной функции  $\Phi$  двух переменных  $t$  и  $t_0$  (рис. 5).



**Рисунок 5** - Локальный потенциал  $\Phi(t, t_0)$  как функция флюкутирующей температуры  $t$  и температуры стабильного состояния  $t_0$

**Figure 5** - Local potential  $F(t, t_0)$  as a function of fluctuating temperature  $t$  and stable temperature  $t_0$

Сечение АВС поверхности  $\Phi$  плоскостью  $t = t_0$  является графиком функции  $\Phi(t, t_0)$ , которая, согласно зависимости (20), равна половине получаемой энтропии. Если соблюдена теорема о минимуме полученной энтропии, то точка В на кривой АВС отвечает стабильному состоянию системы. Но независимо от этой теоремы  $\Phi(t, t_0)$  известно, что функция  $t$  всегда имеет минимум при неизменном значении  $t_0$  в стабильном состоянии (см. кривую PQR). Другими словами, этот минимум относится к классу функций, которые можно рассматривать как возмущения данного стабильного состояния (например, при импульсном подводе теплового потока к слою пояса трения диска за четвертый оборот колеса транспортного средства (рис. 2 в)). Именно поэтому необходим функционал от двух температурных распределений  $t$  и  $t_0$ . Уравнение (11) нельзя интерпретировать как выражение вариационного принципа в обычном смысле, так как  $t_0$  в лагранжиане является лишь параметром. Гораздо целесообразней

рассматривать уравнения (10) и (11) как некое вариационное свойство, которому должно удовлетворять любое стабильное распределение  $t_0(x_j)$ . Это означает, что, если  $\Phi(t, t_0)$  заменить  $t_0$  некоторым другим стабильным распределением, решение уравнения (9), реализующее минимум  $\Phi$ , даст значение  $t^+$  величины  $t$ , отличное от  $t_0$ . Это происходит, например, в точках  $Q_1, Q_2$  и  $Q_3$ , на рис. 5 которые не лежат в секущей плоскости  $t = t_0$ . Наоборот, минимум, соответствующий точке  $Q$ , лежит в плоскости  $t = t_0$  и описывает истинно стабильное состояние. Однако эту точку не следует путать с точкой  $B$  - минимумом образования энтропии. Так как  $t^+$  - функционал заданного стабильного распределения, дополнительное условие (10) записываем в виде

$$t^+(\{t_0\}) = t_0, \quad (21)$$

позволяющем дать физическую интерпретацию метода локального потенциала. Так  $t^+$ , являясь решением вариационной задачи, соответствует нулевому значению вариации  $\delta t$  и, следовательно, нулевому значению положительно определенной формы  $-\delta^2 S$ . Согласно формуле Эйнштейна существует простое соотношение между вероятностью флуктуации и  $\delta^2 S$ . Наиболее вероятное состояние соответствует  $\delta^2 S = 0$ . Поэтому и решение  $t^+$  соответствует наиболее вероятному распределению объемных температур (по сравнению с другими распределениями, допустимыми при малых флуктуациях). С другой стороны,  $t_0(x_j)$  - макроскопическое решение, т. е. среднее температурное распределение, которое означает что  $t_0$  учитывает влияние флуктуации произвольной величины. Поэтому физический смысл дополнительного условия (21) заключается в том, что наиболее вероятное распределение

объемных температур (по отношению к малым флуктуациям) должно совпадать со среднем распределением (по отношению ко всем флуктуациям вообще).

## Заключение

Представленные энергетические уровни трибосопряжений (см. рис. 1) не дают полной картины о существующих потенциалах. К последним еще необходимо отнести: нормальный, течения, кинетический, садиментационный (являются потенциалами межфазной границы); гальвани и дзета, которые являются внутренними потенциалами жидкостного слоя и другие. Необходимо отметить, что явление термодиффузии сопровождается эффектами Соре (движение потока жидкости при наличие градиента температуры) и Дюфора (обратное явление, состоящее в появлении теплового потока при наличие градиента концентраций). При этом явление диффузии зависит от коэффициентов диффузии и подвижности диффузионного потока. Большинство потенциалов принимают активное участие в формировании двойных электрических слоев.

Установлено, что чем выше концентрация жидкости (электролита), тем быстрее падает потенциал с расстоянием, поскольку  $\kappa$  возрастает ( $1/\kappa$  равно расстоянию, на котором потенциал в  $(e)$  раз меньше его значения на поверхности). При данной эквивалентной концентрации толщина двойного слоя уменьшается с увеличением его валентности. Соотношение между поверхностной плотностью заряда и потенциалом поверхности показывает, что при низких значениях последнего эти две величины пропорциональны друг к другу и, таким образом, двойной слой ведет себя подобно конденсатору с постоянной емкостью. Кон-

центрация электролита и его валентность влияют как на заряд, так и на потенциал.

Из других потенциалов необходимо отметить: локальные в кинетической теории; локальный для: стационарного состояния; временных процессов; уменьшение локального потенциала в исследовании устойчивости трибосопряжения при омывании воздушными токами с поперечными и продольными температурными градиентами.

Оперируя в задачах теплопроводности, применительно к сплошному диску тормоза, приращением локального потенциала и его избыточным состоянием позволяет ввести новый блуждающий локальный потенциал. Последний будет иметь положительные и отрицательные значения для процессов нагревания и охлаждения пояса трения диска тормоза транспортного средства.

## REFERENCES

1. Kragelskij I.V. Trenie i iznos / I.V. Kragelskij // M.: Mashinostroenie, 1968. – 480 s. (in Russia)
2. Glensdorf P. Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustojchivosti i flukta-cij / P. Glensdorf, I. Prigozhin // M.: Mir, 1973yu – 269 s. (in Russia)
3. Lyubimov D.I. Fiziko-mekhanicheskie processy pri trenii / D.I. Lyubimov, V.A. Ryzhikov // Novocherkassk: Yu-RGTU, 2003. – 142 s. (in Russia)
4. Adamson A. Fizicheskaya himiya poverhnostej / A. Adamson. – M.: Mir, 1979. – 583 s. (in Russia)
5. De Groot S. Neravnovesnaya termodinamika / S. De Groot, P. Mazur // M.: Mir, 1964. – 452 s. (in Russia)
6. Yaroslavcev A.B. Osnovy fizicheskoy himii. M.: Nauchnyj mir, 2000. – 230 s. (in Russia)
7. Tribologiya: trenie, iznos, smazka / A.Kh. Janahmadov, A.I. Volchenko, K.T. Nabizade [i dr.] // Baku: Apostroff-A, 2019. – 640s. (in Russia)
8. Garkunov D.N. Tribotekhnika: uchenik dlya vuzov. D.N. Garkunov // 2-e izd. pere-rab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 328 s. (in Russia)
9. Diskovye i diskovo-kolodochnye tormoza v mashinostroenii. Tom 1 / A.Kh. Janahmadov, D.A. Volchenko, M.Ya. Javadov, i dr. – Baku «Apostrof - A», 2020. – 376 s. Kulik, V. I. Study of tribological properties of composite materials with a silicon carbide matrix / V. I. Kulik, A. S. Nilov, A. P. Garshin, V. V. Savich, A. A. Dmitrovich, D. I. Saroka // Refractories and Industrial Ceramics. – 2012. – Vol. 53, №4. – P. 259–268. (in Russia)
10. Langhof, N. The effect of residual silicon in CMC brake pads on friction and wear / N. Langhof, R. Voigt, H. Mucha, W. Krenkel // Proc. 6th European Conference on Braking JEF 2010, Lille, France, 2010. – P. 71–78.
11. Li, Zh. Preparation and properties of C/C-SiC brake composites fabricated by warm compacted – in situ reaction / Zh. Li, P. Xiao, X. Xiong // International journal of minerals, metallurgy and materials. – 2010. – Vol. 17, №4. – P. 500–505.

Поступило в редакцию: 01.09.2020  
После доработки: 08.06.2021  
Принято к публикации: 12.06.2021

# **Analysis of Modeling, Optimization and Control Methods of Multifactor Operations and Complex Technological Processes**

**H.V. Gafarzada**

*Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Gafarzada Hikmat / e-mail: aydin.qafarov@hotmail.com

**Abstract**

Modeling, optimization and management of multifactor operations and complex technological processes of machines and equipment parts' enameling was discussed in the article. It has been established that the main advantage of mathematical models construction for individual processing operations is the possibility to create mathematical models in new variants for different technological processes using these models. It was clarified that mathematical models reflecting processing operations and technological processes used to manufacture machine and equipment must take into account the key factors that characterize them. Studies show that the mode and technological factors of separate processing operations and technological processes are directly related to the accuracy and quality of the prepared parts. Taking all these factors into account not only complicates the proposed mathematical models, but also makes difficult, in some cases completely impossible to use and analyze them. From this point of view, they should be divided into main and second grade factors according to their impact level. Therefore, it should be considered appropriate to the purpose to take into account mostly main factors that characterize operations and processes to build mathematical models.

**Key words:** machinery, equipment, operation, technology, processing, process, modeling, optimization, management, factor.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_40\_47

**For citation:**

*Gafarzada H.V.*

[Analysis of Modeling, Optimization and Control Methods of Multifactor Operations and Complex Technological Processes]  
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13. № 2. Pp. 40 – 47 (in English).

## Çoxfaktorlu əməliyyatların və mürəkkəb texnoloji proseslərin modelləşdirilməsi, optimallaşdırılması və idarə edilməsi metodlarının analizi

**H.V. Qafarzadə**

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

### **Yazışma üçün:**

Qafarzadə Hikmət / e-mail: aydin.qafarov@hotmail.com

### **Annotasiya**

Məqalədə, maşın və avadanlıqların detallarının emalının çoxfaktorlu əməliyyatlarının və mürəkkəb texnoloji proseslərinin modelləşdirilməsi, optimallaşdırılması və idarə edilməsi məsələlərinə baxılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, ayrı-ayrı emal əməliyyatları üçün riyazi modellərin qurulmasının əsas üstün cəhəti, bu modellərdən istifadə etməklə fərqli texnoloji proseslər üçün yeni variantlarda riyazi modellərin yaradılması mümkünlüyündür. Aydınlaşdırılmışdır ki, maşın və avadanlıqların hazırlanması üçün tətbiq edilən emal əməliyyatlarını və texnoloji prosesləri əks etdirən riyazi modellər, onları xarakterizə edən əsas faktorları nəzərə almalıdır. Tədqiqatlar göstərir ki, ayrı-ayrı emal əməliyyatlarının və texnoloji proseslərin rejim və texnoloji faktorları, hazırlanan detalların dəqiqlik və keyfiyyət göstəriciləri ilə birbaşa əlaqəlidir. Bu faktorların hamısını nəzərə almaq təklif edilən riyazi modelləri mürəkkəbləşdirməklə bərabər, onlardan istifadəni və analizini çətinləşdirir, bəzi hallarda isə tamamilə mümkünüsüz edir. Bu baxımdan faktorları təsir səviyyələrinə görə, əsas və ikinci dərəcəli faktorlara ayırmaq lazımdır. Buna görə də riyazi modelləri qurmaq üçün yalnız əməliyyatları və prosesləri daha çox xarakterizə edən əsas faktorların nəzərə alınması məqsədə müvafiq hesab edilməlidir.

**Açar sözlər:** maşın, avadanlıqlar, əməliyyat, texnologiya, emal, proses, modelləşdirmə, optimallaşdırma, idarəetmə, faktor.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_40\_47

**УДК:** 614.8.06; 621.9.026

## **Анализ методов моделирования и оптимизация управления многофакторными операциями и сложными технологическими процессами**

**Х.В. Гафарзаде**

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

### **Для переписки:**

Гафарзаде Хикмет / e-mail: aydin.qafarov@hotmail.com

### **Аннотация**

В статье рассматриваются вопросы моделирования многофакторных операций и сложных технологических процессов обработки деталей машин и оборудования. Установлено, что основное преимущество построения математических моделей для отдельных операций обработки заключается в возможности создания с помощью применения этих моделей новых вариантов математических моделей различных технологических процессов. Математические модели, описывающие операции обработки и технологические процессы, должны учитывать характеризующие их факторы. Исследования показывают, что режимные и технологические факторы отдельных операций обработки и технологических процессов непосредственно связаны с точностными и качественными показателями изготовленных деталей. Использование всех факторов усложняет создание математических моделей иногда делает их неприемлемыми для практического применения. Поэтому для построения математических моделей следует применять те факторы, которые наиболее полно характеризуют операции обработки процессов.

**Ключевые слова:** машина, оборудование, операция, технология, обработка, процесс, моделирование, моделирование, оптимизация, управление, факторы.

## Introduction

Multifactorial technological processes of machine and equipment parts processing differs by their specific features and complexity. These factors manifest themselves first of all in the influence on accuracy and quality indicators of the enameled details of separate operations' different and numerous factors, which are an integral part of technological processes. Most of these factors are usually in interaction with each other, the change of one causes the change of the others, and seriously affect the accuracy and quality indicators of the processed details surfaces.

Thus, arise mutual relation between the factors characterizing operations and accuracy (eg, geometric parameters) and quality (eg, roughness, residual stress, micro hardness) indicators of the processed parts surfaces. These relations put additional technological reliability requirements on processing operations. Although there are large enough data for each processing operation in various researches, the vast majority of them differ by their unsystematicity, characterized by chaotic scattering, and in some cases, can be completely unfit condition to use. Therefore, there occur problems in systematizing such information, in extracting some of them and in storing the most important of them. The solution of these issues can be achieved by the modeling of processing operations and technological processes. Such approach actually means understanding of the investigated operation or technological process through modeling.

In general, the data flow is analyzed in two stages. In the first stage, are compared events occurring in model enameling operations or technological processes. If the difference is not big, then it is considered satisfactory. In the

second stage, expectations are compared with the model indicators. This process can be considered as modeling.

**Purpose of work** is to investigate and research the application of methods for modeling, optimization and management of multifactorial operations and complex technological processes in the processing of machine and equipment parts.

## Solving of problem

If we denote all the output parameters of the investigated operation or technological process by  $y$ , the input parameters by  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , then the modeling will be expressed in the form of the following mathematical dependence characterizing the relationship between output and input parameters

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n).$$

The form of this function is determined by the characteristics of the investigated operation or technological process. Dependence shown in determined (relatively simple) processing operations is brought to (1) differential equations, and in stochastic (eg, in free abrasive processing) processing operations to statistical probability equations.

It is usually differentiated two types of modeling - physical and mathematical modeling.

It is more expedient conducting experiments directly at research facilities for physical modeling in processing operations of details. So that, the results of experiments can be expressed in the form of physical quantity units, values of geometric parameters, discrete and continuous quantities, linear dimensions, combinations of different quantities, dependencies between complex variables, dimensionless complexes and other forms.

Measureless complexes can be obtained by the help of differential equations or through the measurement theory methods.

Special attention should be paid to the stability of the defining similarity criteria in physical modeling. That is, the experiments should be carried out in several stages, the main factors of processing operations and their values should be changed by certain regularity.

Thus, the formation of physical model takes place in the research object itself (for example, in the processing operation or in the technological process), during the implementation of preparation process of details.

Such approach can play an important role in the modeling of machine or equipment parts processing operations or technological processes.

It is known that the technological processes of details preparation are quite complex systems, consisting of numerous processing operations. Their technological capabilities checking require large-scale experimental research in factory conditions. However, similarity principle and physical modeling can be fully justified in relatively low factor processing operations and in noncomplex technological processes (for example, in low-throughput operations of simple geometric shapes). Because it is enough to take into account a limited number of criteria as the number of technological factors in such situations is small.

Therefore in machine building, it is more appropriate to use mathematical modeling in the modeling of technological processes with a complex structure and in the processing operations of parts having different constructive forms, which are given high accuracy, quality and wear resistance requirements. As a result of the application of

this method, it is possible to realize modeling, optimization and management of various processing operations, technological processes and systems using a wide range spectrum of computer technology capabilities.

Mathematical modeling consists of three interrelated stages [1]:

1) Formation of the studied process - construction of a mathematical model (compilation of mathematical explanation);

2) Programming (algorithmization) of the solution of the issue to determine the assigned parameter numerical values;

3) Determining the conformity (adequacy) of the model to the studied process.

The simplification and systematization of the separate operations and technological processes studied during the construction of mathematical models depending on the complexity is one of the important conditions. The obtained schemes are explained by using different mathematical methods, taking into account the characteristics of the studied objects.

The held researches and their results correctness should be assessed by the accurate and correct reflection level of the main characteristics of studied processing operations and technological processes in the mathematical models.

Mathematical models reflecting processing operations and technological processes used to manufacture machine and equipment must take into account the key factors that characterize them. Studies show that the mode and technological factors of separate processing operations and technological processes are directly related to the accuracy and quality of the prepared parts. Taking all these factors into account not only complicates the proposed mathematical models, but also makes difficult,

in some cases completely impossible to use and analyze them. From this point of view, they should be divided into main and second grade factors according to their impact level. Therefore, it should be considered appropriate to the purpose to take into account mostly main factors that characterize operations and processes to build mathematical models.

The mathematical description of the model structure can be given in the form of an algebraic or differential equations system, depending on the operation and process. These equations along with reflecting the interaction of different technological factors, should not exclude each other. To determine the type of dependencies which clearly define the relationship between the defined parameters, the sought parameters can be calculated from any set of parameters values of the mathematical expression equations by the help of algorithms.

The most important thing here is that the model expresses qualitative and quantitative indicators of the modeled process quite correctly, ie its full compatibility to the modeled operation or technological process.

It is necessary to compare measurement results performed during operations and processes with the obtained results from the model to verify fully consistence of the mathematical model to the real process.

Models reflecting the processing operations of machine and equipment parts, technological processes of preparation and assembly can be expressed in various mathematical dependencies form. The obtained information as a result of the experiment must be summarized, and the relationship between technological factors and the accuracy and quality indicators obtained as a fulfillment result of operations and technological

processes should be determined. Experimental data can also be widely used besides theoretical methods to build mathematical models.

In mathematical modeling, the course of processing operations and technological processes can be studied directly by using mathematical models unlike physical modeling. Application of computer technology is quite effective in this case. For this purpose, it is possible to change factors which characterize separate processing operations and whole technological processes by using different programs, manage details accuracy and quality indicators.

In principle, physical modeling methods of processing operations and technological processes are based on similar mathematical expressions obtained as a mathematical modeling result. Physical modeling methods can be used to determine variation limits of the coefficients obtained as a mathematical modeling result and to determine the suitability (adequacy) of the mathematical models themselves to the studied processes.

Two main aspects should be taken into account depending on the mathematical expression level of the studied processes a) the whole system of equations which express all the main features of the modeled processes and numerical values of these equations parameters are known; b) the process does not have complete mathematical expression.

The second aspect is characteristic to the management of the processes with no available complete information about them and uncertain affecting factors. In most cases, mathematical modeling is more convenient than physical modeling.

It is possible to use mathematical models with similar or identical in form for different

processing operations and technologics. Expression of different events by similar shaped differential equations can be given as an example to the application of such methods. For example, energy transfer (Newton's law), heat transfer (Fourier's law), mass transfer (Fick's law), and electricity transfer (Ohm's law) laws are identical in writing, but differ in entered parameters (speed, temperature, union, voltage). By entering certain calculation coefficients to each expressions of these laws, it is possible to get unit mathematical model fitting all of them.

Such method can be used to get unit mathematical models that may be useful for different processing operations and technological processes of various details of machine and equipment. Processing of internal, external and side surfaces of cylindrical and conic shaped details on lathes, processing of shown surfaces of these details on internal, external and side polishing machines, creation of mathematical models which can be used for processing of cylindrical and conical surfaces in internal, external, eccentric, rotation honing operations and for other similar operations can be given as an example. Mathematical models can be used for technological processes used in processing of details which have simple and complex constructive parameters consisting of differing each other processing operations [2-5].

Modeling of machine and equipment parts processing operations and whole technological processes in most cases base on optimization principle of their main technological factors to ensure requirements given to the accuracy, quality and wear resistance of the parts surfaces.

The types of mathematical models are selected depending on the machines, devices,

processing tools, measuring and control instruments and devices, as well as other ancillary technical means used in the processing operations, performed on the details or technological processes.

If the main factors of detail processing operations or technological processes change simultaneously according to time and in space, the models expressing such operations and processes are called mathematical models parameters of which are distributed. It is more appropriate to present such models in differential equations form.

If the main factors of processing operations and technological processes do not change in space, then, they are called models parameters of which are centralized (collected in one place).

Complex technological processes are used in the preparation of machine and equipment parts, taking into consideration different geometric shapes of their vast majority, high demands on the accuracy and quality indicators of their surfaces, and numerous used operations in their processing. Therefore, it is necessary to divide the processing technological processes of detail into separate operations, and build component models for each of them, which can be included in the overall model of the process.

One of the advantages of mathematical models forming for individual processing operations is the possibility of forming models for new technological processes in different variants by using these models, ie the aggregation of modeling of process

The complete model of the technological processes of details processing should reflect the interaction of the processing operations main factors in predetermined modes or in a certain period of time, as well as during the

transition from one mode to another.

In the first case, the model is called static, in the second case dynamic.

The static model does not consider changes of parameters in a certain period of time. Before creating static models of processing technological processes, must be analyzed the physico-mechanical (in some cases physico-chemical) nature of the process itself, the purpose of appointment, responsibilities, basic equations to be expressed and distinguishing features.

Determination of input factors and output parameters of the process arrange the next phase in the modeling of technological processes processing. They include controllable factors, changes of which associated with the nature of the process, changes that directly affect the course of the process (it is possible to measure and purposefully change them), factors that affect the course of the process (it is impossible to change them purposefully), factors changes of which indirectly related to the course of the process (intermediate factors). The relationship among shown factors and the course of the process are determined by boundary conditions [1-4].

Static models of operations and processes should be made taking into account the main technological factors of operations and processes used in the processing of details. Shown belong to the models of assembly technological processes at the same time.

Dynamic models are intended to reflect the dynamic properties of processing operations and technological processes. They are used to determine the relationship between the main factors during the change in a certain period of time. Dynamic properties can be determined

by theoretical and experimental methods, or by using both of them together.

Experimental determination of dynamic characteristics is based on accuracy and quality indicators determination obtained as a result of changing of processing operations main factors or technological processes in different ways. The experiments results are analyzed taking into account basic laws and provisions of probability theory, mathematical statistics, information and management theories.

Models of processing operations and technological processes should be built in a transmission function form, the dependence of the processed parts and a whole machine and equipment accuracy and quality indicators on key technological factors. Mathematical models can also be given in the form of ordinary or special derivative differential equations. In such cases, the differential equations must contain in it all dependent and independent factors. Mathematical models of technological processes developed for separate processing operations can be considered as freely usable mathematical models.

Mathematical modeling, optimization and management methods are widely used not only for processing operations and processes, but also in various sphere of industry [6-12].

## Conclusion

Complete mathematical models of processing operations and technological processes of machine and equipment details must cover the followings:

- main technological factors of operations and processes, accuracy and quality indicators of processed parts and ready machines and equipment, relationship among key factors in static condition, restrictions put on processing operations and various technological process-

ses, optimality criteria, optimality functions, relationship among key factors in dynamic situations and so on.

Analysis and research of mathematical models should be carried out by using computer technology in the following sequen-

ce to perform processing operations and technological processes in optimal conditions:

- conducting initial reports, modeling of process, optimization of key technological factors, operations and processes management etc.

## REFERENCES

1. **Kafarov V.V.** Metodi kibernetiki v khimii i khimicheskoy tekhnologii. - M. Kimya, 1976. - 464 p. (in Russia)
2. **Gafarov A.M.** Tekhnologicheskie sposoby povisheniya iznosostoykosti detaley mashin. - Baku: -Nauka, - 1998. - 318 s. (in Russia)
3. **Gafarov A.M.** Rototsionnoe tochenie. - Baku: Nauka, -2000. - 128 s. (in Russia)
4. **Gafarov A.M.** Rototsionnoe khoningovanie. / A.M. Gafarov, G.M. Babaev. - Baku: Nauka, -2000. - 132 p. (in Russia)
5. **Suleymanov P.G.** Tribotekhnicheskie kharakteristiki detaley mashin, exploatirooemikh v extremalnikh usloviyakh. - Baku: Nauka, 2013. - 186 p. (in Russia)
6. **Gafarov A.M.** Issledovanie formirovaniya formi pogreshnostey visokotochnikh nejestkikh detaley pri uprugom raskativani, ochenka pogreshnostey metodami teorii veroyatnosti i matematicheskoy statistiki/ A.M. Gafarov, H.B. Gafarzada, F.M. Kalbiev // Texnologiya mashinostroeniya. - 2020. - №6. - c. 19-26 (in Russia)
7. **Janakhmadov A.Kh.** Neftyanaya tribologiya. - Baku: Nauka, 2003.- 326 p. (in Russia)
8. **Gafarzade H.V.** Some mathematical modeling aspects of multi-factor operations and complex technological processes of machine and equipment parts processing // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. - 2021. - №1. - Pp. 43-49.
9. **Dida A.A.** Optimizachiya parametrov robastnoqo reqoolyatora sistemy oopravleniya kursom sudna / A.A. Dida, E.B. Osokina, P.A. Dida // Vestnik GUMRF im. Admirala S.O. Makarova. – 2016. – №3. – p.211-217.
10. **Besekersky V.A.** Teoriya system avtomaticheskogo regolirovaniya /V.A. Besekersky, E.P. Popov. 4-e izd., pererab.i dop.– SPb.: Professiya, 2004.– 747 p.
11. **Amerongen J.** Adaptive steering of ship: Phd. thesis/ J. Van Amerongen. – Delft University of Technology, 2005. – 156p.
12. **Marley V.E.** Dolevie strooktoori I modelirovanie v otnositelnikh velichinakh // TrSPIIRAN. – 2005. – T.2 – №2. – Pp.94-100 (in Russia).

Received: 23.12.2020  
Revised: 14.06.2021  
Accepted: 21.06.2021

## Application of Fractional Derivatives for the Description of Kinetic Curvature of Thermooxidation Destruction of the Polymers (Part I)

**A.Kh. Janahmadov<sup>1</sup>, O.A. Dyshin<sup>2</sup>, I.A. Habibov<sup>3</sup>, S.A. Agammedova<sup>3</sup>, I.S. Gasanzade<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> SRI "Geotechnological problems of oil, gas and chemistry" (Dilara Aliyeva, 227, Baku, Nasimi area, AZ1010, Azerbaijan)

<sup>3</sup> Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)

### **For correspondence:**

Janahmadov Ahad / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Abstract**

The work provides an analysis of the physical basis for the application of the concept of fractal structure of polymers and fraction differentiation for the study of their condensed state. It is shown that in the process of thermooxidation destruction for oxidation only the part of the polymer ball, which determines its structure, and a fractional part of the fractal (Hausdorff) of the macromolecular ball of the polymer is considered with keeping part in destruction process dimension.

**Keywords:** thermooxidation destruction, physical structure of polymers, fractal size, macromolecular cluster of the polymer, spectral size, fractional production, reaction, bimolecular reaction.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_48\_57

### **For citation:**

Janahmadov A.Kh. et al.

[Application of Fractional Derivatives for the Description of Kinetic Curvature of Thermooxidation Destruction of the Polymers (Part I)]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 48 – 57 (in Russia).

## Kəsir törəmələrindən istifadə etməklə polimerlərdə termoooksidləşdirici distruksiyanın kritik əyrilərinin izahı (I hissə) Ə.X. Canəhmədov<sup>1</sup>, O.A. Dışın<sup>2</sup>, İ.Ə. Həbibov<sup>3</sup>, S.Ə. Ağaməmmədova<sup>3</sup>, İ.S. Həsənzadə<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> "Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və kimya" ETİ (Dilarə Əliyeva küç, 227, Bakı, Nəsimi r-nu, AZ1010, Azərbaycan)

<sup>3</sup> Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı ş., AZ1010, Azərbaycan)

### Yazışma üçün:

Canəhmədov Əhəd / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Annotasiya**

Təqdim olunan işdə polimerlərin fraktal strukturu və kəsir differensiallananın tətbiqi ilə onların kondensasiya olunmuş vəziyyətinin analizi verilmişdir. Göstərilmişdir ki, termoooksidləşdirici destruksiya prosesi zamanı yalnız polimer dolaşığın strukturunu təyin edən hissəsi oksidləşməyə məruz qalır və polimerin makromolekulyar dolaşığının fraktal (Hausdorfov) ölçüsünün qalan kəsir hissəsi destruksiya prosesində saxlanılan hissə ilə üst-üstə düşür.

**Açar sözlər:** termoooksidləşdirici destruksiya, polimerlərin quruluşu, fraktal ölçü, makromolekula topası, spektral ölçü, kəsir törəmə, bimolekula

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_48\_57

---

УДК: 947.91.222

## Применение дробных производных для описания кинетических кривых термоокислительной деструкции полимеров (часть I)

А.Х. Джанахмедов<sup>1</sup>, О.А. Дышин<sup>2</sup>, И.А. Габибов<sup>3</sup>, С.А. Агамедова<sup>3</sup>, И.С. Гасанзаде<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химии» (ул. Диляры Алиевой, 227, Баку, Насиминский р-он, AZ1010, Азербайджан)

<sup>3</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг 16/21, г. Баку, AZ1010, Азербайджан)

### Для переписки:

Джанахмедов Ахад / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Аннотация**

В работе дается анализ физических основ применения концепции фрактальной структуры полимеров и дробного дифференцирования для исследования их конденсированного состояния. Показано, что в процессе термоокислительной деструкции окислению подвергается только часть полимерного клубка, определяемая его структурой, и дробная часть фрактальной (Хаусдорфовой) размерности макромолекулярного клубка полимера совпадает с долей, сохраняющейся в процессе деструкции.

**Ключевые слова:** термоокислительная деструкция, физическое строение полимеров, фрактальная размерность, макромолекулярного клубка полимера, спектральная размерность, дробная производная, псевдомолекулярная реакция, бимолекулярная реакция.

## Введение

В результате широкого спектра теоретических и экспериментальных исследований [1–4] установлено, что влияние старения на структуру и свойства аморфных полимеров обусловлено термодинамической неравновесностью стеклообразного состояния и сам процесс старения можно рассматривать как медленное приближение к равновесию системы с широким распределением времен релаксации. При достаточно низких (порядка комнатной) температурах этот процесс идет довольно медленно и существенные изменения свойств реализуются за времена порядка нескольких лет. Так что, прогнозирование таких явлений для систем, подвергающихся старению, должно производиться с учетом как пространственного, так и временного беспорядка [5].

Как показали эксперименты по физическому старению [6], контролирующим свойства показателем является состояние надсегментальной (кластерной) структуры полимера, которое в свою очередь, можно целенаправленно регулировать применением молекулярной ориентации и термообработки. Ранее предполагалось, что термин «структурная стабилизация» применим лишь к твердофазному состоянию полимеров, характеризуемому четко выраженной структурой (особенно в случае аморфно-кристаллических структур), в то время как полимерный расплав рассматривался как бесструктурное состояние. Отсутствие до недавнего времени количественных структурных модулей полимеров в любом из указанных состояний вынуждало исследователей прибегать к тем или иным косвенным методам оценки структуры. Попытка учесть влияние топологического беспоряд-

ка (уровня переплетения полимерных цепей) на процессы термоокислительной деструкции предпринята в работе [6], где были использованы косвенные характеристики структуры.

В случае полимеров структурным элементом наименьшего порядка является статистический сегмент, выражающий по существу индивидуальность полимера. В физике полимеров структура определяется как микро- и макроструктура полимера, а также как связь структура-состав-свойство.

Главным недостатком большинства эластомеров является быстрое старение в условиях эксплуатации. По сравнению с металлами, которые с учетом антикоррозионных мероприятий служат 15 и более лет, эластомеры и изготовленные на их основе изделия имеют в большинстве случаев гораздо более короткий срок службы. Знание механизма старения дает возможность решать задачи увеличения сроков службы изделий и прогнозировать их работоспособность в различных условиях.

В последние годы широко развивались исследования кинетики и механизма старения и стабилизации полимерных материалов. На базе этих исследований родилось новое направление в химии высокомолекулярных соединений – химическая физика старения и стабилизации полимеров [2], включающее изучение не только элементарных реакций и макроскопических стадий старения и стабилизации, но и роль в этих процессах физической организации полимера, динамики молекулярных движений и других физических факторов, определяющих эксплуатационные свойства полимерных материалов.

При изучении процесса старения полимеров как в естественных, так и в искус-

ственных условиях получают различные кинетические зависимости изменения показателей эксплуатационных свойств материалов или показателей, косвенно связанных с этими свойствами (например, поглощение кислорода при термоокислительном старении, уменьшение массы образца при термической деструкции и т.д.).

Физическое старение полимеров отражает их термодинамически неравновесную (фрактальную) структуру. Экспериментально показано [7], что твердофазные полимеры являются фрактальными объектами в интервале линейных масштабов  $\sim 3\text{--}50\text{\AA}$ .

Кроме того, как показано в [8], макромолекулярный клубок полимера в расплаве представляет собой фрактал с размерностью  $\Delta_f \approx 2,5$ . Корректное описание фрактальных объектов возможно только в рамках фрактального анализа с использованием фрактальной геометрии [9], а любое применение евклидовой геометрии является более или менее точной аппроксимацией. Исходя из этого, в основе предлагаемой в [3] структурной трактовки процессов термоокислительной деструкции положен постулат фрактальной природы структуры полимеров. Такой подход позволяет получить количественную оценку изменения структуры (и, стало быть, свойств) полимеров как функцию продолжительности старения.

Использование фрактальной размерности макромолекулярного клубка для характеристики структуры полимерного расплава дало возможность выполнить количественную оценку и предсказание кинетических кривых поглощения кислорода и предельной степени термоокислительной деструкции, а также получить аналитический структурный критерий перехода типа кине-

тических кривых от автозамедленного к аутоскореному [3].

### **Физические основы применения фрактального анализа и дробного дифференцирования для исследования структуры конденсированного состояния полимеров**

Как показано в работе [10], уравнения в дробных производных описывают эволюцию некоторой физической системы с потерями, как например, процесс распада и превращения частиц во многих реальных явлениях в физике, химии, технике, биологии и т.п. [11,12, 13]. При этом дробный показатель  $v_d$  производной указывает на долю состояний системы, сохраняющихся за все время эволюции  $t$ . Такие системы могут быть классифицированы как системы с «остаточной» памятью, занимающие промежуточное положение между системами, обладающими полной памятью, с одной стороны, и марковскими системами, с другой. Фрактальная структура полимеров является именно такой промежуточной системой, часть которой теряется в процессе термоокислительной деструкции. Дробный показатель  $v_d$  совпадает с фрактальной размерностью множества Кантора.

Напомним, что множество Кантора рассматривается в одномерном евклидовом пространстве ( $d=1$ ), поэтому его фрактальная размерность равна  $d_f < 1$  в силу определения фрактала. Для фрактальных объектов в евклидовых пространствах с более высокими размерностями ( $d > 1$ ) в качестве  $v_d$  следует принимать дробную часть размерности  $\Delta_f$  (в нашем случае—это фрактальная (Хаусдорфова) размерность макромолекулярного клубка в расплаве) [13].

$$v_d = \Delta_f - (d - 1) \quad (1)$$

Тогда величина  $v_d$  характеризует долю фрактала (макромолекулярного клубка), сохраняющуюся в процессе деструкции. Доля макромолекулярного клубка  $\beta_d$ , распадающаяся в процессе деструкции, определяется как

$$\beta_d = 1 - v_d = d - \Delta_f \quad (2)$$

или, поскольку в рассматриваемом случае  $d=3$ ,  $\beta_d = 3 - \Delta_f$  (3)

Между фрактальными размерностями структуры макромолекулярного клубка в растворе  $D$  и структуры конденсированного состояния (расплава) было получено простое соотношение [13], которое для линейных полимеров имеет вид:

$$\Delta_f = 1,5D, \quad (4)$$

а для разветвленных:

$$\Delta_f = 1,67D. \quad (5)$$

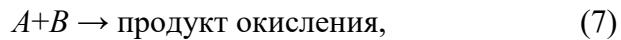
Существует достаточно большое число методов определения величины  $\Delta_f$  для полученных из разных растворителей полимеров [3], поскольку структура клубка определяет свойства растворов и, следовательно, величины их основных характеристик. Зависимость  $D$  от молекулярных характеристик полимера  $C_\infty$  и  $S$  предложена в [14]:

$$D = 2 - 4 \times 10^{-10} \left( \frac{2}{C_\infty^2 S} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $C_\infty$  – характеристическое отношение, которое является показателем статистической гибкости макромолекулы;  $S$  – площадь поперечного сечения макромолекулы.

В гетерогенных средах, к которым относится структура конденсированного состояния полимеров, протекание реакций не подчиняется классическим закономерностям описания химических реакций [15]. Это различие обусловлено структурными особенностями указанного состояния полимеров. В наилуче простой трактовке, тер-

моокислительную деструкцию полимера можно представить бимолекулярной реакцией [5]:



где  $A$  – макромолекула полимера,  $B$  – молекула кислорода.

Скорость такой реакции  $k_p$  в гетерогенной (фрактальной) среде описывается следующим соотношением:

$$k_p \sim t^{-h}, \quad (8)$$

где  $t$  – продолжительность реакции,  $h$  – показатель неоднородности среды ( $0 < h \leq 1$ ), обращающийся в нуль в случае классического поведения (реакции в гомогенных или евклидовых средах), и тогда  $k_p = \text{const}$ .

Показатель  $h$  связан с эффективной спектральной размерностью  $d'_s$  структуры полимеров следующим уравнением:

$$d'_s = 2(1 - h), \quad (9)$$

которая согласно теореме о субординации связана со спектральной (фотонной) размерностью  $d_s$  так [16]:

$$d'_s = \beta' d_s, \quad (10)$$

где  $\beta'$  – параметр, характеризующий распределение времен перескоков (например, молекул оксиданта). Спектральная размерность  $d_s$  оценивается согласно уравнению

$$d_s = \frac{2d_f}{1 + d_f}, \quad (11)$$

в нашем случае  $d_f = \Delta_f$ .

При исследовании химических реакций на фрактальных объектах необходимы коррекции на наличие в системе небольших кластеров. Именно такие коррекции требуют использования в теоретических оценках не спектральной размерности  $d_s$ , а ее эффективной величины  $d'_s$ .

В работе [17] показано, что структура аморфного полимера в стеклообразном состоянии представляет собой перколяцион-

ный (точнее, термический) кластер, порог переколяции которого на температурной шкале совпадает с температурой стеклования  $T_c$ . Формирование такого переколяционного кластера определяется наличием в полимерах при температурах  $T \leq T_c$  областей локального порядка. Напомним, что при анализе структуры аморфных полимеров в качестве модели локального порядка используется кластерная модель [17]. Эта модель постулирует, что области локального порядка (кластеры), погруженные в рыхлоупакованную матрицу, состоят из нескольких плотноупакованных коллинеарных сегментов разных макромолекул, т.е. являются аморфным аналогом кристаллита с вытянутыми цепями (КВЦ).

При  $T > T_c$  совокупность областей локального порядка распадается и структура полимера более не является переколяционной системой. Структуру полимерных расплавов можно трактовать как набор большого числа отдельных кластеров (макромолекулярных клубков), а траектория молекулы (атома) кислорода на такой структуре моделируется случайным блужданием [18]. В этом случае для оценки величины  $d'_s$  применимо уравнение, полученное Аргиракисом:

$$d'_s = d_s \left( 2 - \frac{d}{d - \beta/v} \right), \quad (12)$$

где  $\beta$  и  $v$  – критические индексы переколяции  $\beta = \frac{1}{d_f}$ ,  $v = \frac{2}{d_f}$ .

Сочетание уравнения (12) с уравнением

$$d_f = d - \frac{\beta}{v} \quad (13)$$

и уравнением

$$\Delta_f = \frac{d_s(d+2)}{2} \quad (14)$$

позволяет получить формулу

$$d'_s = \frac{2(2\Delta_f - d)}{d + 2}, \quad (15)$$

из которой по известным значениям  $\Delta_f$  можно рассчитывать величину  $d'_s$ .

Из уравнений (9) и (15) получим

$$h = \frac{2(d+1-\Delta_f)}{d+2} \quad (16)$$

Размерность  $d'_s$  является основным структурным фактором, контролирующим процесс термоокислительной деструкции расплавов гетероцепных полиэфиров [19, 20]. Взаимосвязь размерностей  $d'_s$  и  $\Delta_c$  дается уравнением (15).

Значения величины  $d'_s$ , рассчитанные по формулам (9) и (15), в общем случае приближенно равны, поэтому второе из этих значений принято называть структурной величиной и обозначается  $d'_{scmp}$  [3].

Уравнение фрактальной кинетики для описания кривой количества поглощенного кислорода  $N_{O_2}$  от времени  $t$  для термоокислительной деструкции полимера имеет вид [3]

$$\frac{dN_{O_2}(t)}{dt} = k_d (N_{O_2}^\infty - N_{O_2}(t))^n, \quad (17)$$

где  $N_{O_2}^\infty$  – количество поглощенного кислорода;  $n$  – порядок реакции  $n$  связан с эффективной спектральной размерностью  $d'_s$  следующим уравнением:

$$n = 1 + \frac{2}{d'_s} \quad (18)$$

Сочетание уравнений (15) и (18) дает аналитическое соотношение между физическим (структурным) параметром  $\Delta_f$  и химической характеристикой термоокислительной деструкции  $n$

$$n = 1 + \frac{d+2}{2\Delta_f - d} \quad (19)$$

В рамках фрактальной кинетики величина  $k_d$  определяется эффективной связностью структуры, т.е. величиной  $d'_s$ . Уменьшение  $d'_s$  по мере роста температуры старения  $T_{cm}$  приводит к снижению  $k_d$ . Более низкие зна-

чения  $k_d$  во фрактальном пространстве показывают обязательное снижение скорости реакции по сравнению с евклидовым пространством.

Взаимосвязь между  $k_d$  и  $d'_s$  достаточно просто выясняется в рамках фрактального анализа [3] в рамках фрактальных реакций в неупорядоченных средах диффузию реагента (молекулы оксиданта, радикала и т.д.) на фрактальной структуре полимера можно представить как блуждание этого реагента. Существует два основных типа блужданий: случайное блуждание (СБ) и случайное блуждание с непрерывным временем (СБНВ). Если в случае СБ нет зависимости по времени между двумя последовательными блужданиями, то в случае СБНВ следующее блуждание может быть реализовано только через определенный промежуток времени после предыдущего. Таким образом, в случае СБНВ по существу вводится фрактальное множество времен событий (фрактальное время в терминологии Б.Мандельброта) [9]. Траекторию молекулы (атома) кислорода на структуре полимера можно описать СБНВ. Число мест на структуре полимера  $\langle S \rangle$  (число реакционноспособных центров макромолекул), посещенных СБНВ, как функция времени дается так [3]:

$$\langle S \rangle \sim t^{d'_s/2} \quad (20)$$

Можно предположить, что величина  $k_d$  будет тем выше, чем больше реакционноспособных центров смогут посетить молекулы (атомы) кислорода:  $k_d \sim \langle S \rangle$ . Тогда:

$$\ln k_d \sim \ln \langle S \rangle \sim d'_s/2 \sim d'_s \quad (21)$$

Расчет порядка реакции, обусловленного пространственным беспорядком ( $n_{np}$ ) связан с показателем  $h$  следующим уравнением:

$$n_{np} = \frac{2-h}{1-h} \quad (22)$$

При  $d'_{scmp} = d_s$  временной беспорядок отсутствует и порядок реакции  $n = n_{np}$ , а при  $d'_s \neq d_s$  порядок реакции  $n$  рассчитывается по формуле (19), а порядок реакции, обусловленный временным беспорядком ( $n_{sp}$ ), определяется теоремой о субординации [20]:

$$n = n_{np} \cdot n_{sp} \quad (23)$$

Очевидно, что при  $T_{cm} > T_{nl}$  ( $T_{cm}$  и  $T_{nl}$  – температура старения и плавления) порядок реакции  $n$  в уравнении (17) контролируется как пространственным, так и временным беспорядком, что соответствует известным данным.

$N_{O_2}^\infty$  в уравнении (17) можно определить следующим образом [9]:

$$N_{O_2}^\infty = \beta_d \cdot N_{O_2}^T, \quad (24)$$

где  $N_{O_2}^T$  – теоретическое количество кислорода, необходимого для окисления всех метильных (ароматических) и алифатических групп в рассматриваемом полимере, измеряется в моль  $O_2/\text{осн}\cdot\text{моль полимера}$ ;  $\beta_d$  определяется формулой (2). Величина  $N_{O_2}^\infty$  определяется химическим строением полимера; для полиарилатарилесульфоноксида (ПААСО) она равна 24,1 моль  $O_2/\text{осн}\cdot\text{моль ПААСО}$ .

В рамках фрактальной модели структуры полимерных расплавов число прореагированных молекул вещества  $A$  (в случае термоокислительной деструкции – это молекулы  $O_2$ )  $\rho_A$  должны подчиняться скейлинговому соотношению [3]:

$$\rho_A \sim \xi^{-\Delta_f}, \quad (25)$$

где  $\xi$  – характеристический размер макромолекулярного клубка объемом  $v_{kl}$ :

$$v_{kl} \sim \xi^{-4_f}, \quad (26)$$

Частицы низкомолекулярного вещества (молекулы оксиданта, радикалы и т.д.) движ-

гаются по фракталу случайным блужданием с размерностью  $d_w$ , что позволяет записать  $\xi = t^{1/d_w}$ . (27)

Для реакции типа



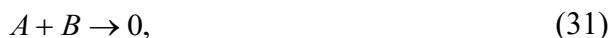
т.е. псевдомономолекулярной реакции, получим

$$\rho_A = N_{O_2} \sim t^{\Delta_f/d_w} \quad (29)$$

Для евклидовых пространств  $\Delta_f=d$  и  $d_w=2$  получили [3]:

$$\rho_A = N_{O_2} \sim t^{d/2} \quad (30)$$

Для бимолекулярной реакции



соотношение (30) определяется следующим образом:

$$\rho_A = N_{O_2} \sim t^{d/4} \quad (32)$$

Показатель  $d_w$  в соотношении (29) определяется из равенства

$$d_s = \frac{2\Delta_f}{d_w} \quad (33)$$

Из сочетания (29) и (33) можно получить аналог соотношений (30) и (32) для реакции окисления во фрактальном пространстве. Для реакции типа (28)

$$\rho_A = N_{O_2} \sim t^{d_s/2} \quad (34)$$

а для реакции типа (31)

$$\rho_A = N_{O_2} \sim t^{d_s/4} \quad (35)$$

Однако размерность  $d_s$  описывает только геометрическую связность фрактала [20], тогда как для реальных конденсированных сред не менее важен учет временного (энергетического) беспорядка. Для описания последнего эффекта в реальных условиях в выражениях (34) и (35) следует принимать не значение  $d_s$ , а величину эффективной спектральной размерности  $d'_s$ , определяемую уравнением (15).

В последнее время большое внимание уделяется физическим аспектам протекания

реакции типа (28) и (31) [20] и было показано, что эти реакции могут быть описаны степенной функцией вида

$$\rho_A \sim t^x, \quad (36)$$

где  $\rho_A$  – количество вещества  $A$ , прореагировавшего за время  $t$ ,  $x$  – показатель.

Величина показателя  $x$  зависит от ряда факторов: пространства, в котором протекает химическая реакция (евклидового или фрактального), размерностей, характеризующих эти пространства, и типа реакции (моно- или бимолекулярная реакция). Поэтому, исследуя реакции окисления в рамках концепции [20], можно получить более полное представление об условиях их протекания.

Используя уравнения (34), (35), можно построить зависимость  $N_{O_2}(t)$  в двойных логарифмических координатах и определить показатель  $x$  в соотношении (36). Как показано в [3], граничным условием реализации кинетических кривых автозамедленного и автоускоренного типа является критерий  $x=1$  в соотношении (36): при  $x < 1$  реализуется автозамедленный тип окисления, а при  $x > 1$  – автоускоренный. При  $x=1$  получается линейная зависимость  $N_{O_2}(t)$ , также встречающаяся на практике. Для реакции типа (34) в евклидовом пространстве характер кривой  $N_{O_2}(t)$  определяется размерностью этого пространства: для  $d=1$ ,  $x < 1$  (автозамедленный режим), для  $d=2$ ,  $x=1$  (линейная зависимость) и для  $d=3$ ,  $x > 1$  (автоускоренный режим). Для реакции типа (35) в евклидовом пространстве с любой размерностью  $d \leq 3$  кинетические кривые будут представлять автозамедленный режим. Поскольку максимальные значения  $d_s=4/3$  [20] и  $d'_s=1,20$  (уравнение (15) при  $\Delta_f=3$ ), то реакции во фрактальных пространствах все-

гда будут характеризоваться автозамедленным типом кинетических кривых.

Существует два основных типа скейлинговых соотношений: степенные или экспоненциальные [3]. Результаты скейлингового анализа термоокислительной деструкции ПК (поликарбоната на основе бисфенола A) с разной структурой показали [3], что начальные участки кинетических кривых  $N_{O_2}(t)$  автоускоренного и автозамедленного (*S*-образного) типов описывают протекание окисления в идентичных условиях – во фрактальном пространстве с размерностью, равной размерности поверхности макромолекулярного клубка  $\Delta_n = \Delta_f - 1$ . Дальнейший ход кинетической кривой определяется типом пространства, в котором протекает окисление: переход в евклидово пространство дает резкое (практически линейное) ускорение окисления, а переход во фрактальное пространство с размерностью, равной фрактальной размерности макромолекулярного клубка  $\Delta_f$  – резкое замедление окисления, при этом  $\Delta_f$  достигает критического значения, при котором количество реакционноспособных мест в объеме и на поверхности клубка становится одинаковым. Переход от периода индукции (периода медленной реакции) к резкому ускорению термоокислительной деструкции обусловлен изменением типа пространства, в котором протекает реакция, от фрактального к евклидову [3].

## Заключение

Основой применения теории дробного интегро-дифференцирования для описания термоокислительной деструкции полимерных расплавов является неоднородность их структуры, допускающая реализацию де-

струкции только в части макромолекулярного клубка. Эффективный объем клубка  $V_{kl}^{\phi}$ , поглощающий кислород, прямоилинейно зависит от разности  $3 - \Delta_f$ , где  $\Delta_f$  – фрактальная (Хаусдорфовая) размерность макромолекулярного клубка в расплаве. Такая зависимость возможна только для фрактальных объектов, а для евклидовых объектов объем реакционноспособной части системы равен нулю. Следовательно, термоокислительная деструкция полимеров возможна только в случае фрактальности их структуры.

Рост  $\Delta_f$  означает увеличение компактности макромолекулярного клубка полимера и, следовательно, ослабление диффузии кислорода в его внутренние области. При определенном значении  $\Delta_f = \Delta_f^{kp}$  происходит изменение типа кинетической кривой и осуществляется переход кинетических кривых окисления от автозамедленного режима – периода индукции процесса окисления – к автоускоренному режиму. Критические значения  $\Delta_f^{kp}$  зависят от размерности  $d$  евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, и радиуса инерции  $R_g$  макромолекулярного клубка.

Появление в процессе термоокислительной деструкции полимеров кинетических кривых «количество поглощенного кислорода – время»  $N_{O_2}(t)$  автозамедленного типа в рамках классической химической трактовки объясняется «выгоранием» реакционноспособных групп. Причины замедления поглощения кислорода со временем для кинетических кривых  $N_{O_2}(t)$  носят гораздо более общий характер, чем предполагалось ранее. Такой причиной может быть фрактальность среды, в которой протекает термоокислительная деструкция.

## REFERENCES

1. Shlyapnikov Yu.A., Kiryushkin S.G., Mar'in A.P. Antiokislitel'naya stabilizaciya polimerov. –M.: Himiya. 1986. – 256 s. (in Russia)
2. Emanuel N.M., Buchachenko A.L. Himicheskaya fizika molekulyarnogo razrusheniya i stabilizaciya polimerov –M.: Nauka. 1988. –368 s. (in Russia)
3. Dolbin I.V., Kozlov G.V., Zaikov G.E. Strukturnaya stabilizaciya polimerov: fraktal'nye modeli –M.: Izd-vo «Akademiya Estestvoznaniya». 2007. –328 s. (in Russia)
4. Janahmadov Ahad, Javadov Maksim. Fractal Approach to Tribology of Elastomers. USA, SPRINGER, 2018. – 400 p.
5. Blyumen A., Klafter Dzh., Cumofen G. V Kn.: Fraktaly v fizike. Red. P'etronero L., Tozatti E. M.: Mir. 1988. S. 561-574.
6. Shlyapnikov Yu.S., Kolesnikova N.N. In book: Aging of Polimer Blends and Polymer composites. Ed. Zaikov G., Buchachenko A., Ivanov V., V.2. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2002. P. 123-131.
7. Zemlyanov M.G., Malinovskij V.K., Novikov V.N., Parshin P.P., Sokolov A.P. //Zhurnal eksperimentalnoj i teoreticheskoy fiziki. 1992. T.101. №1. S. 284-293.
8. Vilgis T.A. // Physics A. 1988. V. 153. №2. P. 341-354.
9. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. San-Francisco: W.H. Freeman and Comp., 1982. 459 p.
10. Nigmatullin R.R. Drobnyj integral i ego fizicheskaya interpretaciya. //Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika, 1992. T. 90. №3. s. 354-367.
11. Janahmadov A.Kh., Dyshin O.A., Askerova N.Z. Fraktalnyj podhod prognozirovaniyu sostoyaniya samoorganizacionnoj krtichnosti prirodnih sistem // Vestnik Azerbajdzhanskoj Inzhenernoj Akademii, 2012, t.4 №3, S.97-106
12. Janahmadov A.Kh., Dyshin O.A., Javadov M.Y. Sinergetika i fraktaly v tribologii. Baku: APOSTROFF, 2014. – 504 p.
13. Kozlov G.V., Temiraev K.B., Malamatov A.H. / Himicheskaya promyshlennost'. 1998. №4. S. 230-232.
14. Budtov V.P. Fizicheskaya himiya rastvorov polimerov. SPb.: Himiya. 1992.384 s.
15. Kopelman R. V kn.: Fraktaly v fizike. Red. P'etronero L. Tozatti E. M.: Mir. 1988. S. 524-527.
16. Meakin P., Stanley H.E. Spectral dimension for the diffusion limited aggregation model of colloid growth. //Phys. Rev. Left. 1983. V.51. №16. R. 1457-1460.
17. Sanditov D.S., Kozlov G.V., Belousov V.N., Lipatov Yu.S. The model of fluctuation free volume and cluster model of amorphous polymer // Ukrainian Polymer J., 1992, v.1. №3-4, pp. 241-258.
18. Argirakis P. V kn.: Fraktaly v fizike. Red. P'etronero L., Tozatti M., M.: Mir.1988. s. 513-518.
19. Meakin P., Stanley H.E. //J. Phys. A. 1984. V.17. №1. R. L173-L177.
20. Kang K., Redner S. // Phys. Rev. Lett. 1984, v.52. №12. R.955-958.

Поступило в редакцию: 18.09.2020  
После доработки: 13.06.2021  
Принято к публикации: 19.06.2021

## Physical Methods for Evaluating the Load of Friction Pairs of Braking Devices (Part I)

**M.Y. Javadov<sup>1</sup>, D.A. Volchenko<sup>2</sup>, V.S. Skrypnyk<sup>2</sup>, N.A. Volchenko<sup>3</sup>,  
A.S. Evchenko<sup>2</sup>, A.N. Vudvud<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

<sup>3</sup> Kuban State Technological University (International Activities Support Department, Room A-523, 2, Moskovskaya st., Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)

<sup>4</sup> Odessa National Polytechnic University (Shevchenko pr. 1, Odessa, 65044, Ukraine)

### **For correspondence:**

Ahad Janahmadov / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Abstract**

Materials of the article apply to the physical methods for estimating the load of friction pairs of brake devices. Methods are expressed by principles influencing the physicochemical properties of materials of friction pairs and their internal and external parameters. Principles include causation, symmetry, reciprocity and equivalence, affinity, superposition (elementary and complex). The principles have been analyzed and it is shown as they extend to the energy fields of friction pairs of brakes. Based on the action of the principles, the following pairs are distinguished: "mechano-thermal", "chemico-thermal" and "electro-magnetic". The materials of this article only pay attention to "mechano-thermal" energy field at electromechanical friction coupling of pairs of friction of brake devices.

**Keywords:** physical methods; braking devices; friction pair; metal-plate friction element; mechanical and thermal load.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_58\_68

### **For citation:**

Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Evchenko A.S., Vudvud A.N.  
[Physical Methods for Evaluating the Load of Friction Pairs of Braking Devices (Part I)]  
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 58 – 68 (in English)

## Əyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodları (I hissə)

M.Y. Cavadov<sup>1</sup>, D.A. Volchenko<sup>2</sup>, V.S. Skrypnik<sup>2</sup>, N.A. Volchenko<sup>3</sup>,  
A.S. Yevchenko<sup>2</sup>, A.N. Vudvud<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (15 Karpat ska küç., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

<sup>3</sup> Kuban Dövlət Texnoloji Universiteti (Beynəlxalq Fəaliyyətlərə Dəstək şöbəsi, Otaq A-523, Moskovskaya küç., 2, Bld. A, Krasnodar, 350072, Rusiya)

<sup>4</sup> Odessa Milli Politexnik Universiteti (Şevçenko pr.. 1, Odessa, 65044, Ukrayna)

### **Yazışma üçün:**

Canəhmədov Əhəd / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Annotasiya**

Məqalədə əyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodlarına baxılıb. Metodlar sürtünmə cütü materiallarının fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərinə, onların daxili və xarici parametrlərinə təsir edən prinsiplərə əsaslanıb. Prinsiplərə səbəb-nəticə əlaqəsi, simmetriya, qarşılıqlılıq və ekvivalentlik, affinlik və superpozisiya (elementar və mürəkkəb) daxildir. Təhlil olunub göstərilmişdir ki, bu prinsiplər əyləclərin sürtünmə cütünün enerji sahələrini əhatə edir. Prinsiplərin təsirinə əsasən aşağıdakı cütlər ayırd edilir: "mexano-termik"; "kimyəvi-istilik" və "elektromaqnit". Məqalədə yalnız əyləc qurğularının sürtünmə cütünün elektromehaniki friksion əlaqəsi zamanı "mexano-termik" enerji sahəsinə baxılıb.

**Açar sözlər:** fiziki metod, əyləc qurğusu, sürtünmə cütü, metal plastin materialdan hazırlanmış friksion element, mexaniki və istilik gərginliyi.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_58\_68

УДК: 539.219.2

## **Физические методы оценки нагрузки фрикционных пар тормозных устройств (часть I)**

**М.Я. Джавадов<sup>1</sup>, Д.А. Вольченко<sup>2</sup>, В.С. Скрыпник<sup>2</sup>, Н.А. Вольченко<sup>3</sup>,  
А.С. Евченко<sup>2</sup>, А.Н. Вудвуд<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

<sup>3</sup> Кубанский государственный технологический университет, Отдел сопровождения международной деятельности, каб. А-523 (ул. Московская, д. 2, корп. А, Краснодар, 350072, Россия)

<sup>4</sup> Одесский Национальный политехнический университет (просп. Шевченко 1, Одесса, 65044, Украина)

### **Для переписки:**

Джанахмедов Ахад / e-mail: dzhankhmedov@yahoo.com

### **Аннотация**

В статье рассматриваются физические методы оценки нагрузки фрикционных пар тормозных устройств. Методы основаны на принципах, влияющих на физико-химические свойства материалов пар трения и их внутренние и внешние параметры. Принципы включают причинно-следственную связь, симметрию, взаимность и эквивалентность, аффинность и суперпозицию (элементарную и сложную). Проанализировано и показано, что эти принципы распространяются на энергетические поля пар трения тормозов. На основании действия принципов выделяют следующие пары: «механотермические»; «химико-тепловой»; «электромагнитный». В статье рассматривается только «механотермическое» поле энергии при электромеханической фрикционной связи пар трения тормозных устройств.

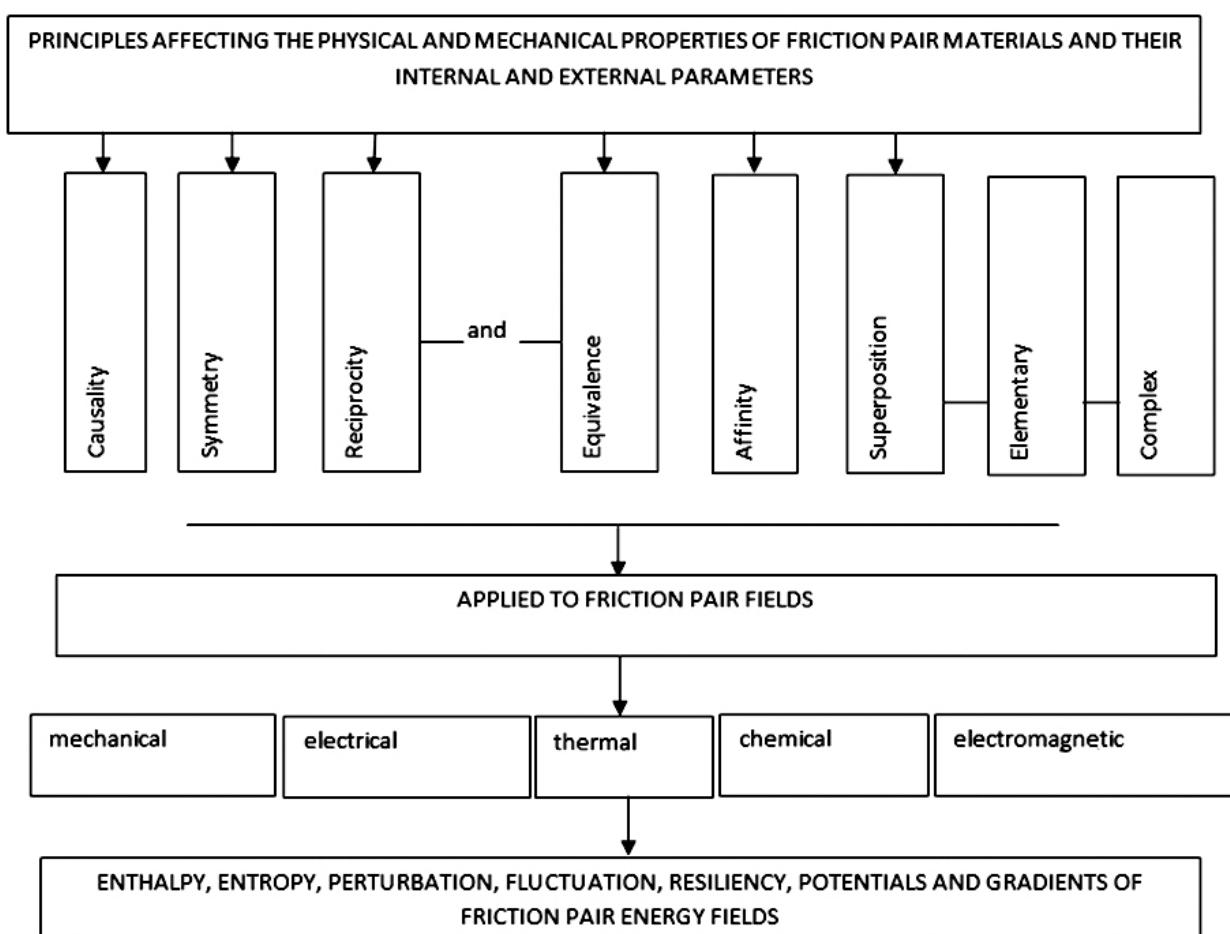
**Ключевые слова:** физические методы, тормозные устройства, пара трения, фрикционный элемент из металлической пластины, механическая и тепловая нагрузка.

## Introduction

The application of various general physical principles opens wide possibilities for calculation and analysis of the thermal mode of metal friction elements of disc-drum type and strip-block type of braking devices and becomes a qualitatively new method for solving thermal problems.

The material of the proposed articles is largely focused on the development and implementation of this method, which can be called the physical principle method or, in short, the principle method.

Among the principles that are used in the articles are the principles according to the figure 1. The principles of symmetry, equivalence, superposition (elementary and complex) have long been applied in thermodynamics and heat transfer, although unreasonably not enough. The principle of reciprocity was not used for thermal problems. In contrast, the work [1] paid attention to all principles in the case of a plate of a given thickness in which the temperature sources interact as well as a symmetrical arrangement.



**Figure 1.** Principles, perturbations, potentials and gradients in metal polymer friction pair energy fields

The analysis of literary sources and the state of the problem. Brief reference to the principles of thermal problems. Causation is the mutual relationship between processes,

phenomena and effects where one is the cause of the other. Symmetry is the proportionality of the parts of the product located on either side from the middle of the center.

Reciprocity applies to some heat conductivity problems; this means that if the heat source  $I_s$  at point 1 causes a temperature change at point 2,  $\Delta t = f(\tau)$ , then if you move the source to point 2, at point 1, the same temperature change  $\Delta t$  will occur.

It should be emphasized that at reciprocal speeds the changes of temperatures are the same, but the gradients of the temperature are different, so it should be remembered that the transition to a mutual problem is not a transition to an equivalent problem - the temperature fields turn out to be different.

The importance of reciprocity in heat conductivity problems is known [1]. These include with the action of a heat source: in a semi-enclosed body or in an unlimited plate; in a plate covered with a layer of turbulent liquid, and in a plate with a layer of liquid and an adiabatic condition on one boundary; and in a boundary condition of type III on the other boundary. The equivalence, in relation to thermal problems, is that the replacement of any ambiguity condition does not affect the thermal regime of the body in question - all temperatures remain constant.

The principle of equivalence indicates the possibility of equivalent substitution of sources of heat and heat resistance, as well as thermo-physical characteristics, geometric shape and body size. It should be reminded that there are two types of heat sources:  $I_t$  - sources of the given temperature and  $I_s$  - sources of the given intensity of the heat flow. Sources of  $I_s$  can be both external and internal.  $I_t$  sources can only be external. Therefore, there may be equivalent substitutes as follows:

- external sources of any type ( $I_t$  or  $I_s$ ) are replaced by external sources of another type;

- external sources of type  $I_t$  and  $I_s$  are replaced by internal sources of type  $I_s$ ;

- internal sources of type  $I_s$  are replaced by external sources of type  $I_t$  or  $I_s$ .

An equivalent replacement of internal sources with another type of internal source is not possible, as internal sources can only be of one type -  $I_s$ .

The substitutions can be complete or partial, but in all cases the principle of equivalence is preserved - the heat mode of the whole body «does not notice» changes of the conditions of unambiguousness.

All equivalent transitions (substitutions) are reversible. For example, if it is shown that it is possible to replace a source of type  $I_s$  with a source of  $I_t$ , then the possibility of a reverse transition is shown.

Affinity - a similarity in basic properties or in generality. For example: affinity to an electron, chemical affinity, electrochemical affinity.

Superposition - the resulting effect of several independent effects, is the sum of the effects caused by each effect individually.

The principle of superposition can be elementary and complex. The elementary principle of superposition states the following. If the superposition of the temperature fields in the system is considered, provided that the power of the heat source, the coefficients of the individual parts of the system and its coefficients of heat exchange are temperature-independent, as illustrated [2]. The latter focuses on the conditioned environment and its temperature, as well as on the system's own pointed overheating.

Thus, in this form, the methods of principles cannot be used in friction pairs of brakes and therefore need to be improved.

### Problem statement

The use of physical principles for friction pairs of braking devices problem should be resolved and the friction interaction of their mechanical and thermal fields should be considered. The main issues of the article are evaluation of the load of friction pairs of braking devices; mechanical with heat load of

the braking friction units. The objective of the work is to justify the use of physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices.

Evaluation of the load of friction pairs of the braking devices. It is known that the load of the friction pairs of the strip-drum and disc-block type of brakes depends on many subjective and objective factors. For example, for the strip type brake of the drill winch, objective factors are drilling technology, climatic and physiological conditions; subjective factors are the quality of the production of the equipment, the qualification of the maintenance personnel, etc. For drum- and disc-block brakes of means of transport the objective factors are climatic and road conditions; subjective factors are the quality of the overall braking mechanism, drivers' qualification, vehicle driving techniques, etc. Understandably, it is practically impossible to take all these factors into account when mathematically describing the heating processes of the brake unit components.

**Table.** Classic list of boundary conditions

The type of the boundary condition	Dependancies	
	I-st	Body surface temperature is known( $t_n$ )
	II-nd	External heat flux to body ( $q_v$ ) is specified $-\lambda \frac{\partial t_n}{\partial x} \Big _{x=+0} = q_v. \quad (1)$
	III-rd	Heat flux from the surrounding medium is directly proportional to the temperature difference between the surrounding and the surface of the body $-\lambda \frac{\partial t_n}{\partial x} \Big _{x=+0} = \alpha(\vartheta - t_{x=+0}) \quad (2)$
	IV-th	The body is in contact with another body that has different thermal-physical characteristics $t_{n1} \Big _{x=+0} = t_{n2} \Big _{x=-0}. \quad (3)$

For the complete analytical description of convective and radiative heat exchange of the surfaces of metallic friction elements of the brakes, it is necessary to set systems of equations and unambiguous conditions. Listed in the table four boundary conditions (classical) make up the conditions of one-digit, and the set of initial and boundary conditions is called boundary conditions.

Legend:  $\lambda$ ,  $\alpha$  - heat conductivity coefficients, heat output;  $q_v$  – specific heat flux; indices  $x=+0$  and  $x=-0$  - external and internal surfaces;  $\partial t_n / \partial x$  – temperature gradient on body thickness;  $\vartheta$  – heating temperature.

These initial conditions meet the classical list of boundary conditions

$$t(x, y, z, \theta) = f_3(x, y, z). \quad (4)$$

In general,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $\alpha$  can be functions of coordinates, temperature, and time. On a case-by-case basis, especially in mobile boundary problems where phase transformations occur, boundary conditions may be recorded in a slightly different form, but in principle boundary conditions I - IV types cover all possible cases.

In recent years there have been works in which the question of formalism of boundary conditions I-IV types covers all possible cases.

In recent years, there have been works that have raised the issue of formalism of boundary conditions of types I-IV, especially for non-stationary tasks. For example, in [3] it is shown that non-stationary heat transfer problems should generally be solved as conjugate, i.e. the heat transfer equations should be solved simultaneously for the medium surrounding the body. In [4] it is shown that when solving heat transfer problems, boundary conditions type II correspond better to the physical pattern of phenomena than conditions of type III. For non-stationary modes, the coefficients  $\alpha_q$ ,  $\alpha_m$  are more fictitious than for stationary modes, where both  $\alpha_q$ , and  $\alpha_m$  are formally introduced. In principle, the problems of heat

exchange with solids should be solved as related problems, but in some cases boundary conditions of type II and III are justified [5].

Note that non-linear tasks are those in which:  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  - temperature function;  $\alpha$ ,  $q$  - temperature functions;  $\rho$  is the temperature function; the coordinates of the phase boundaries depend on the temperature (moving boundaries whose position is determined by temperature).

When evaluating the energy load of friction pairs of braking devices, it is necessary to know: the geometric parameters of the friction pairs and their shape; the thermal-physical characteristics of the materials; initial and boundary conditions; the maximum energy loading of the metal friction elements and the heat-exchange capacity thereof, which consists in the joint action of the conductive heat exchange with the radiative and conductive heat exchange from their surfaces, and the acceptable temperature for the polymeric lining materials.

These four conditions are called unambiguity conditions and the set of initial and boundary conditions are called boundary conditions.

The energy intensity of the working surfaces of the pulley rim and drum, as well as the treadmill of the disc friction (solid and self-ventilated) depends on the metal content of the discs. The smaller the latter is, the faster a metal friction element will warm up. The above-mentioned heat exchanges must also interact with the conductive type of heat exchange.

The metallic friction elements of the brakes enter the fixed and thermostatic zones. In the first case, the amount of heat generated by the friction pair is released into the environment. In the second case, the temperature gradient on the thickness of the metal friction element becomes minimal. In addition, the surface layer of the polymeric lining changes its aggregate state. The account

of the above elements of the friction pair requires different initial conditions for the temperature zones, which results in variable unambiguity conditions.

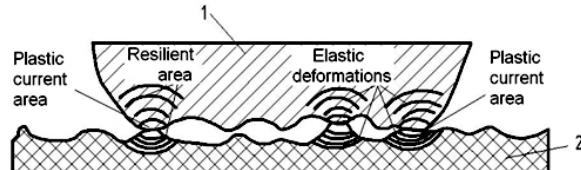
### Mechanical with heat load of brake friction units

The friction process is inherently dissipative and is characterized by the generation of electrical and thermal currents. Friction heating determines to a large extent the conditions for interaction of friction surface micro projections, the change of their area and the destruction thereof (value of the actual and contour area of the touch, maximum electrical and thermal currents, elastic deformation and its energy levels in the working layers of micro projections which in turn affect the area of actual contact; the values of elementary normal forces and friction forces per unit of actual contact area, etc.). Therefore, studies and tests of mechanical loading of metal-polymeric friction pairs make it possible to assess normal forces, friction forces, dynamic friction coefficient, braking torque developed by friction pairs and wear intensity of their working surfaces in a wide range of changes in the temperature of friction, assuming that they are impulsive in character, obeying wave field theory.

The laws of elasticity occurring during contact-impulse interaction of the micro projections of the surfaces of metal-polymeric friction pairs at small deformations thereof reflect the mutually unambiguous relationships between pulsed stress values and deformations. Under the action of dynamic loads, electrical and thermal currents, the surface layers of metal-polymeric friction pairs are subjected to plastic deformations.

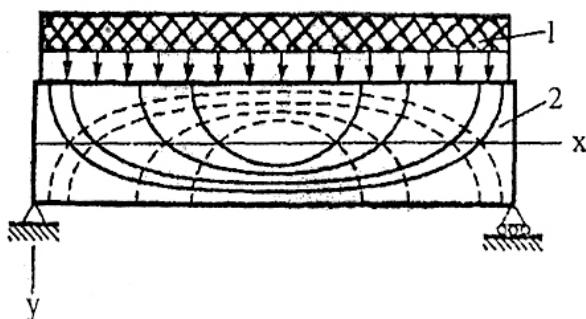
It is known that mechanical energy is an ordered form of energy, while internal energy is disorderly. The deformations of micro projections when contacting surfaces of

«metal-polymer» friction pair are represented on figure 2.

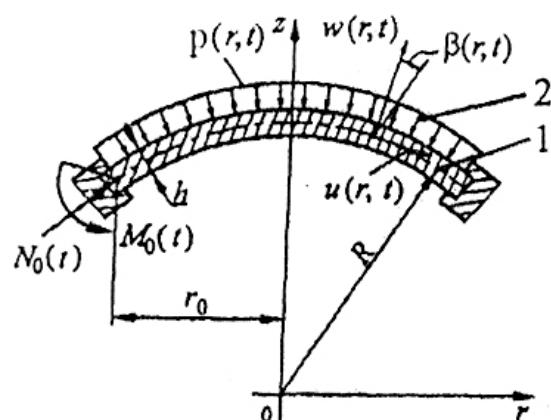


**Figure 2.** Deformation of micro-projections in contact with friction pair «metal (1) - polymer (2)»

The trajectories of the main tensioning and compressing swirling stresses in the pulley rim with uniform load distribution in the pair of friction «polymer-metal» are given in fig. 3.



**Figure 3.** Trajectories of the main tensioning (-) and compressing (-) stresses in the pulley rim with uniform load distribution in the friction pair «polymer (1) - metal (2)»



**Figure 4.** Pulse loading scheme of the friction pair «polymer (1) - metal (2)» in the strip-block type brake

Figure 4 and Figure 5 a, b. show the schemes of the impulse loading of the friction pair «polymer – metal» in the strip-block type brake and the regularity in external and internal parameters changes in its sector. The following legend are used:  $r$  - the polar coordinate of the point;  $h, R$  - the thickness of the shell and the radius of curvature of its median surface;  $t, T_{inv}$  - the time of reciprocal action: normal, dimensional;  $p, q$  - the surface loads in the meridian and normal directions;  $N_0, Q$  - effort: membrane, transverse;  $M_0$  is a bending moment;  $u, w$  is the displacement of the median surface of the shell in the meridian and normal directions;  $\beta$  is the rotation angle of the normal to the median surface.

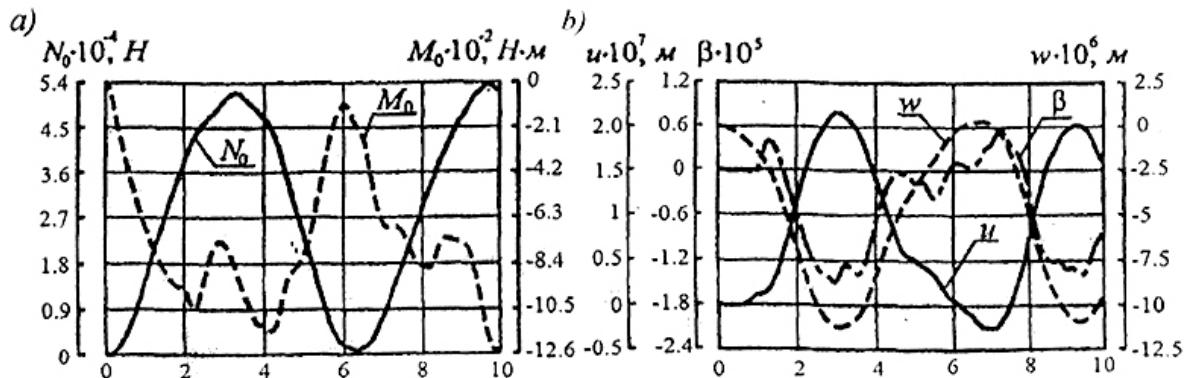
According to the first variant, the specific load impulse given by the formula  $Q(t)=q_0 \cdot H(t)$ , where  $q_0=10^5 \text{ H/m}^2$ ,  $H(t)$  is the unit Hebyrside function, affects the shell.

In the second variant, the shell is affected by the specific load impulse in the form of «steps» given by the formula  $Q(t)=q_0[H(t)-H(t-\omega)]$ , where  $\omega$  is time of the specific load pulse.

Figures 5 a, b illustrate the systematized and unsystematic (but which can be reduced to systematized) sinusoidal curves generated by the impulse loading of the metal-polymeric friction pair of the brake.

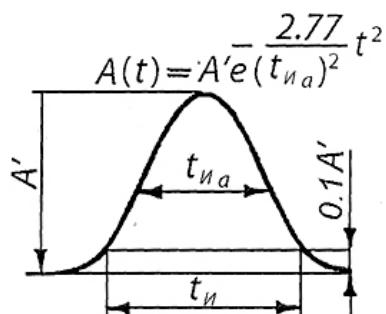
The impulse application of the load to the micro projections of the surfaces of the friction of metal-polymeric pairs at the initial braking moment causes the generation of pulsed electrical currents.

The sinusoidal electric impulse and its characteristics are illustrated in figure 6. The following symbols are used:  $A'$  amplitude;  $t_H$  – pulse duration;  $t_{Ha}$  – pulse duration of  $0.5 \cdot A'$ . The electric impulse is characterized by the short-term deflection of the electric voltage or current force from some constant value.



**Figure 5 a, b.** Regularity of change in the shell sector: a - membrane force ( $N_0$ ) and bending moment ( $M_0$ ) from the value of the dimensional time; b - shifting of the median surface in meridian ( $u$ ) and normal ( $w$ ) directions at the angle of rotation ( $\beta$ ) normal to the median surface in the plane of the meridian from the dimensional time

The empirical dependence of current impulse determination on time is assigned to Figure 6 (where  $e$  is the base of the natural logarithm). The current impulse is expressed in amperseconds in the case of a random time current flow. It should be stated that the electric impulse and electromagnetic flat wave are described by the same law, the sinusoid.



**Figure 6.** Sinusoidal electric pulse and its characteristics

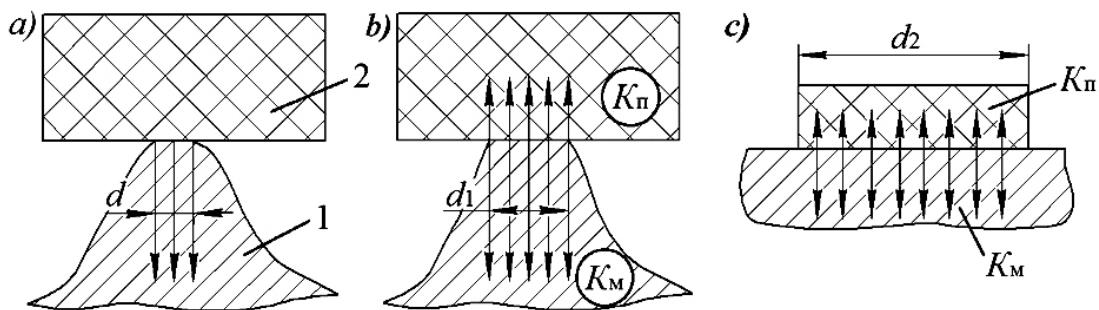
The strong temperature oscillations in the initial friction period are related to the unburdening of electrical currents on the micro projections of the surfaces with the continuous attenuation thereof towards the end is also connected with the migration of «the hot spots», which rise on the friction surfaces as a result of contact discreteness. Judging by the wave frequency of temperature changes in the

areas of thermocouples arranged at different points of the surface layer of the lining, the movement of «the hot spots» obeys some aperiodic regularity, due to the uneven distribution of normal forces on the surface of the friction contact, and as a consequence of the specific loads, as well as wear. Typical increase of temperature difference with increase of hardness of material of the surface layer of the lining is connected, obviously, with the change of sizes of the «hot spots» and more uneven distribution of them on the surfaces of friction micro projections.

Figures 7 a, b, show the proposed calculation models for estimating the characteristics of the interaction of the contact spots with different diameters of the «metal-polymer» friction pairs of the generation of electric and thermal currents.

Figure 7 b, introduces legend  $K_M$ ,  $K_n$ , which mean the coefficients of heat flux distribution respectively in the metal and polymer friction elements [6]. It should be noted that with the increase of the area and the contact spots of the micro-projections, the growth of charged particles on their surfaces is observed.

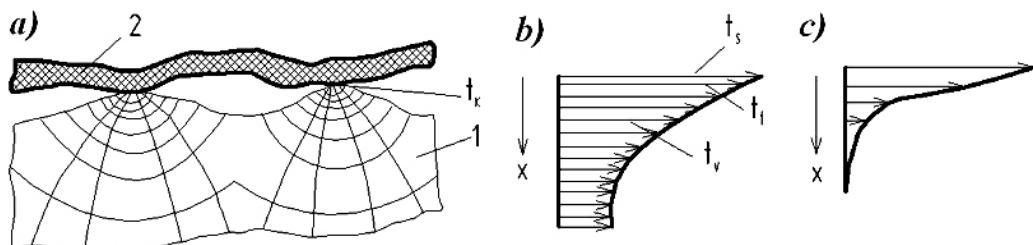
We analyze the heat-loading capacity of the surface and surface layers of the friction elements of metal-polymer pairs.



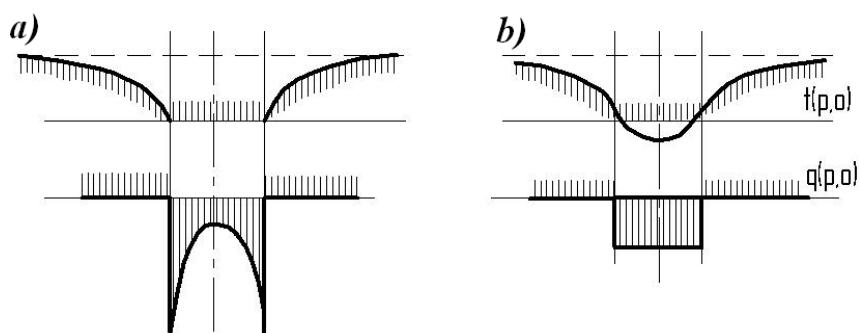
**Figures 7 a, b, c** In Calculation models for estimating the interaction characteristics of contact spots with different diameters ( $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) of the pair «metal (1) - polymer (2)» at the generation of: a - impulse electric currents; b, c - impulse temperature currents: flashes; surface

According to the classical theory [5, 6, 7] in close proximity to the contact points of the friction pair «metal (1) - polymer (2)» (Figure 8 a) separate semispherical isothermal surfaces are formed, fusing into a common surface at some depth. The arrangement of

isothermal surfaces is characterized by the magnitude of the temperature gradient. In general, the temperature field in the metallic and polymeric friction elements related to the surface and subsurface layers, respectively, is presented in Figure 8 b, c.



**Figures 8 a, b,** In the temperature field of the surface layer of the metal (1) element (a) during friction and envelope changes in temperature in it (b) and in the surficial layer of the polymer (2) element (b):  $t_f$ ,  $t_k$ ,  $t_s$ ,  $t_b$  – temperature: friction, occurring in the deformation zone of the microregions of the working surface; contact, formed at points of contact; surface, formed at macro-sectors of friction surfaces; bulk, occurring in the body of the friction element below the deformation zone.



**Figures 9 a, b** Temperature distribution ( $t$ ) and heat flux ( $q$ ) on the contact spot at: a –  $t=\text{const}$ ; b –  $q=\text{const}$

The latter shows the following temperatures in the interaction area:  $t_f$  – friction, occurring in the deformation zone of the microregions of the working surface;  $t_k$  – contact, occurring in the contact points;  $t_s$  – surface, occurs on the macro-regions of friction surfaces;  $t_v$  – bulk, occurs in the body of the friction element below the deformation zone.

Figures 9 a. b show the temperature distribution ( $t$ ) and current heat ( $q$ ) on the contact spot at: a -  $t = \text{const}$ ; b —  $q = \text{const}$ . However, such an ideal temperature ( $t$ ) and heat current ( $q$ ) on the contact spot in friction pairs is impossible due to the inversion of currents between the interacting zones.

In braking devices having a non-massive metallic friction element (vehicles, some tiering machines, etc.), until the friction linings have reached the permissible temperature, a counter-body performs the role of a thermoelectric generator (metal friction element) and thermoelectric refrigerator - surface layers of friction linings. When the temperature is exceeded, the picture is reversed. In the strip-block brake of the drill winch the metal friction element is massive, it is a thermoelectric generator. The heat state of the surface layers of the friction linings of the tape differs.

Theoretical and experimental studies have shown that the energy levels of the surface and superficial layers and the mechanical characteristics of the materials are significantly affected by their heating speed and forced cooling as well as their cycling. The latter causes a significant change in the nature of structural transformations in surface and superficial layers and, as a result, contributes to changes in the physical and mechanical properties of their materials [8].

When the rim of a pulley made of steel of 35HNL with different temperature gradients on its working surface and thickness is heated, phase transformations occur in the material of

the surficial layer of the rim, leading to the formation of austenite in it. This reduces the volume of the surface rim layer due to the uneven heating of the surficial rim layer, while the volume of all the lower rim layers has increased due to the linear expansion caused by their heating. As a result, the outer austenitic uneven layer compresses the internal volume of the rim layers, and in the first, compressive stresses develop, contributing to the occurrence of cross-sectional cracks on the rim working surface at the most thin cross-sections.

Thus, from the comparison of gradients of the mechanical properties of the surface and superficial layers of the pulley rim materials (strength, elasticity, stresses of various kinds)' and temperature gradients, special requirements for permissible heating rates and forced cooling have to be formulated for the development phases in the above-mentioned layers. It is important to note that the type of breakage of the contact surfaces of metal-polymer friction pairs is determined by the gradients of the mechanical properties of the materials, the temperature gradients on the working surface of the pulley rim and the thickness thereof, metastability of friction linings surfaces and the external environment surrounding their working surfaces.

## Conclusion

The use of the physical components for friction pairs of braking devices will allow:

- to systematize and present in a drawing the principles, perturbations, potentials and gradients in the energy fields of metal-polymer friction pairs;

- systematize the sequence of processes, effects and phenomena of electrothermomechanic friction;

- consider not only the friction interaction fields separately, but also examine them in pairs to determine the influence of one on the other;

- the following unambiguous conditions have been introduced for the solution of thermal problems in order to evaluate the energy load of different types of friction units:

- the geometric parameters of the friction pairs and their shape;
- the thermophysical characteristics of the materials;
- initial and boundary conditions;
- is the maximum energy loading of the

metal friction elements and the heat exchange capacity thereof, which consists in the combined effect of the conductive heat exchange with the radiative and convective heat exchange from the surfaces thereof, and the tolerable temperature for the polymeric lining materials;

- the initial conditions for the metal friction element should be variables that would correspond to its fixed and thermostatic state.

## REFERENCES

1. **Pekhovich A.I.** Calculations of the thermal regime of solids (Raschetyi teplovogo rezhima tverdyih tel) / A. I. Pekhovich, V. M. Liquid // L.: Energy, 1976. - 352 pp.
2. **Muchnik G.F.** Methods of heat exchange theory. Thermal radiation (Metodyi teorii teploobmena. Teplovoe izluchenie). // G. F. Muchnik, I. B. Rubashov // M.: High school, 1974. - 272 pp.
3. Non-stationary heat exchange (Nestatsionarnyyi teploobmen) / V.K. Koshkin, E.K. Kalinin, G.A. Dreitzer, S.Y. Yareho // M.: Mechanical engineering, 1973. - 328 pp.
4. **Tsvetkov F.F.** Heat-mass exchange (Teplomassoobmen) / F.F. Tsvetkov, B.A. Grigoriev // M.: Izd-vo MEI, 2005. - 215 s.
5. **Kozdoba L.A.** Electrical modeling of heat and mass transfer phenomena (Elektricheskoe modelirovanie yavleniy teplo- i massoperenosov) / L.A. Kozdoba // M.: Energy, 1972. - 296 s.
6. **Volchenko A.I.** Heat calculation of the brake devices (Teplovoy raschet tormoznyih ustroystv) // Lviv: Izv-pre Lviv. Unkt, 1987. - 136 s.
7. **Doulnev G.N.** Thermal regimes of electronic equipment (Teplovye rezhimyi elektronnoy apparatury) /// G. N. Doulnev, N. N. Tarnovsky // L.: Energy, 1971. - 248 pp.
8. **Janahmadov A.Kh., Volchenko N.A., Javadov M.Y. et al.** The problem of probable distribution patterns of the main operational friction pair parameters of brakes // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. Vol.13, No 1, 2021. Pp. 13-19.

Received: 20.11.2020  
Revised: 14.06.2021  
Accepted: 19.06.2021

## Determination of the Running Mode of the Drilling Tool into the Borehole Taking into Account the Piston Effect

A.M. Aliyev

Azerbaijan State Oil and Industrial University (Azadlig ave, 34, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

**For correspondence:**

Aliyev Alesker / e-mail: alesker.mehlerrem@gmail.com

**Abstract**

When the drill string is run into the well, the load acting on the system can in some cases reach a dangerous level due to the load acting during pulling up. For example, if the weight of the casing being lowered into the hole is greater than the weight of the raised drill string, or when the drill string is lowered into the hole at high speed, very large dynamic forces can be generated that do not exist during pulling out. The only controllable parameters when running the drill string into the well for the length of one plug are the maximum value of the descent speed and the rate of deceleration. The relationship between these two parameters ultimately determines the efficiency of the lowering operation, which, in turn, is characterized by such factors as the operating mode of the equipment; compliance with technological requirements; physical load of the operator (driller). The goal is to determine the scientifically and technically sound mode of running the drilling tool taking into account the piston action. The permissible speeds of the drilling tool and the displacement of the string for the length of one plug during the well run, the speed of fluid movement in the annulus, were determined based on the equation of equilibrium of pressures in the well. Taking into account the turbulent regime of fluid movement in the annulus, the regime of safe running of the tool was determined to prevent hydraulic fracturing and ensure high-quality development of the productive horizon.

**Keywords:** drill pipe, annulus, lowering speed, piston effect, flushing fluid, plug movement, pressure balance.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_69\_77

**For citation:**

Aliyev A.M.

[Determination of the Running Mode of the Drilling Tool into the Borehole Taking into Account the Piston Effect]  
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13. № 2. Pp. 69 – 77 (in Azerb.)

## Piston effektini nəzərə almaqla qazıma alətinin quyuya endirilmə rejiminin müəyyən olunması

Ə.M. Əliyev

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 34, Bakı ş., AZ1010, Azərbaycan)

### Yazışma üçün:

Əliyev Ələsgər / e-mail: alesker.mehlerrem@gmail.com

### **Annotasiya**

Qazıma kəmərini quyuya endirdikdə sistemə təsir edən yüksək bəzi hallarda qaldırma zamanı təsir edən yüksək qorxulu həddə çata bilər. Qazıma kəmərini bir şam uzunluğunda quyuya endirdikdə idarə olunan parametrlər ancaq endirmə sürətinin maksimum qiyməti və əyləmənin intensivliyidir. Bu iki parametr arasındaki münasibətlər son nəticədə endirmə əməliyyatının səmərəliyini müəyyən edir və onlar da öz növbəsində avadanlığın istismar rejimi; texnoloji tələblərə əməl etmə; operatorun (qazmaçının) fiziki yüksənməsi kimi amillərlə səciyyələndirilir. Piston effektini nəzərə almaqla qazıma alətinin elmi və texniki cəhətdən əsaslandırılmış endirmə rejiminin müəyyən olunması hədəf kimi götürülmüş, qazıma alətinin quyuya endirilməsi prosesində onun buraxıla bilən sürəti, şamın yerdəyişməsi, mayenin həlqəvi fəzadakı hərəkət sürəti quyuda yaranan təzyiqlərin balans tənliyinə əsaslanaraq müəyyən olunmuşdur. Həlqəvi fəzada mayenin hərəkətinin turbulent rejimində baxılaraq, laylarda hidravlikı yarılmmanın baş verməməsi və məhsuldar horizontun keyfiyyətlə mənimsənilməsinin təmin olunması üçün alətin təhlükəsiz endirilməsi rejimi müəyyən olunmuşdur.

**Açar sözlər:** qazıma kəməri, həlqəvi fəza, endirmə sürəti, piston effekti, yuma mayesi, şamın yerdəyişməsi, təzyiq balansı.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_69\_77

УДК 622.24.051.553

## **Определение режима спуска бурового инструмента в скважину с учетом поршневого эффекта**

А.М. Алиев

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 34, г. Баку, AZ1010, Азербайджан)

### Для переписки:

Алиев Алекскер / e-mail: alesker.mehlerrem@gmail.com

### **Аннотация**

При спуске бурильной колонны в скважину нагрузка, действующая на систему, в некоторых случаях может достигать опасного уровня из-за нагрузки, действующей во время подъема. Единственными контролируемыми параметрами при спуске бурильной колонны в скважину на длину одной свечи являются максимальное значение скорости спуска и интенсивность торможения. Взаимосвязь между этими двумя параметрами в конечном итоге определяет эффективность операции спуска, которая характеризуется такими факторами, как режим работы оборудования; соблюдение технологических требований; физическая нагрузка оператора (бурильщика). В статье определены допустимые скорости бурового инструмента и перемещения колонны на длину одной свечи в процессе спуска скважины, скорость движения жидкости в затрубном пространстве на основании уравнения равновесия давлений в скважине. С учетом турбулентного режима движения жидкости в затрубном пространстве определен режим безопасного спуска инструмента для предотвращения гидроразрыва пластов и обеспечения качественного усвоения продуктивного горизонта.

**Ключевые слова:** бурильная труба, затрубное пространство, скорость спуска, поршневой эффект, промывочная жидкость, перемещение свечи, баланс давления.

## Giriş

Qazıma qurğusu qaldırma kompleksi məxanizmlərinin iş rejimi ən ağır iş rejiminə aid olunur: gün ərzində məxanizmlərin yüklənmə əmsalı vahidə bərabər, bir saatdakı təkrar qoşulmaların sayı 120-dən çox, müddəti isə 40%-dən böyük olur. Təsir edən yüklərin xarakterini görə qazıma qurğusunun qaldırma kompleksi texnoloji yüksəkqaldırma maşınlarından fərqlənir. Əgər bu maşınlarda qaldırılan yük havada asılı qalır və hərəkət zamanı öz çəkisini dəyişmir, qazıma qurğularında qarmağa düşən yük qazıma məhluluna daldırılmış qazıma kəməri ilə yaradıldıqdan hərəkət zamanı kəmiyyətcə dəyişir. Buna səbəb qazıma məhluluna daldırılmış qazıma kəmərinə təsir edən hidroavtomatik məqavimət və qazıma kəmərinin quyu divarına sürtünməsidir.

Quyu lüləsinin ideal şaquli vəziyyətdə olmadığı səbəbindən qazıma və qoruyucu kəmərlər quyu divarına sürtünərək endirilir. Hərəkətin istiqamətindən asılı olaraq (endirmə yaxud qaldırma) sürtünmə qüvvəsi qaldırma sistemini təsir edən yüklənməni azalda yaxud artırıbilər.

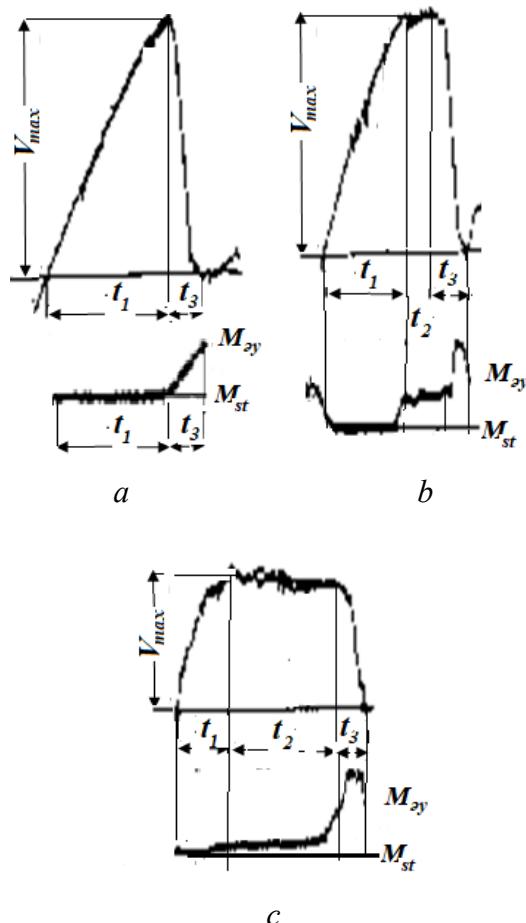
Qazıma kəmərini quyuva endirən zaman şamlar bir-bir əlavə olunduğundan onun çəkisi tədriclə artır və bununla əlaqədar olaraq endirmə sürətinin və əyləmə qüvvəsinin (momentinin) xarakteri də dəyişir. Bu zaman konkret bir rejim təklif etmək olmaz, şamların sayı qədər rejim qəbul etmək olar. Lakin, demək olar ki, bütün təcrübəli qazmaçılar hərəkətin birinci dövründə endirmə vaxtını minimum etmək üçün çalışırlar ki, kəmər qısa müddətdə buraxıla bilən sürətə çatsın. Bu isə əyləcin işə qoşulmamış vəziyyətində mümkünür. Belə rejim kəmərin çəkisi az olduqda mümkünür. Ağırlıq artıraqca böyük sürətlər və bundan asılı olaraq böyük ətalət qüvvələri yaranı bilər ki, bu da əyləmə zamanı ciddi çətinliklər törədər, bəzi

halarda isə qəzalara və bədbəxt hadisələrə səbəb olar. Bu baxımdan tədqiq olunan məsələ aktualdır.

Təcrubi tədqiqatlar və nəzəri mülahizələr əsasında o nəticəyə gəlmək olar ki, alətin quyuva endirilməsi əsasən iki rejimlə aparılır [1-5]:

- iki dövrlü (üçbucaq rejimli);
- üç dövrlü (trapesiya rejimli).

Təcrubi müşahidələr göstərir ki, köməkçi əyləc işə qoşulana qədər iki və qismən üç dövrlü rejim, qoşulduqdan sonra isə üç dövrlü rejim həyata keçirilir (şəkil 1) [3].



Şəkil 1 - Qazıma alətinin quyuva endirilmə rejimləri: a - iki dövrlü; b, c - üç dövrlü

Figure 1 – Drilling tool lowering modes: a - two-cycle; b, c - three periods

İlk boru şamlarının endirilməsində, onların ağırlığından yaranan statik moment az olduğundan həmin moment az qala triboqovuşmalarda yaranan sürtünmə momenti və tal sistemi elementlərinin elastiki deformasiyası ilə tarazlaşır.

Bu zaman əyləci işə qoşmaq lazım gəlmir. Müəyyən müddətdən, yəni alət maksimum sürətə çatdıqdan, sonra əyləc işə qoşulur, sistemin hərəkət sürətini azaldaraq sıfır endirir, yəni sistemi dayandırır (şəkil 1,a).

Endirmə rejiminin tam təsviri baraban valının hərəkət taxoqramı və əyləcin qoşulma qrafikini özündə birləşdirən idarə qrafikidir.

Hər iki növ rejimdə idarə əsas əyləclərin köməyi ilə aparılır. Üç dövrlü rejimlərdə əsas əyləc köməkçi əyləclə (hidrodinamiki yaxud elektrodinamiki) birlikdə istifadə olunur.

Trapesiya rejimli idarə zamanı endirmə prosesində yaranan enerjinin əsas hissəsini köməkçi əyləc, qalan 15...20% hissənin qəbul edilməsi və son olaraq dayandırma əsas əyləcin payına düşür.

Üç dövrlü rejimin I dövründə - *işəsalma* - elevator maksimum sürətədək hərəkət alır, II dövrə - *qərarlaşmış* - əsas əyləclə köməkçi əyləcin birgə təsirindən sürət məhdudlaşdırılır, III dövrə - *əyləmə* – hərəkət sürəti sıfır qədər azalıdır (şəkil 1, b,c).

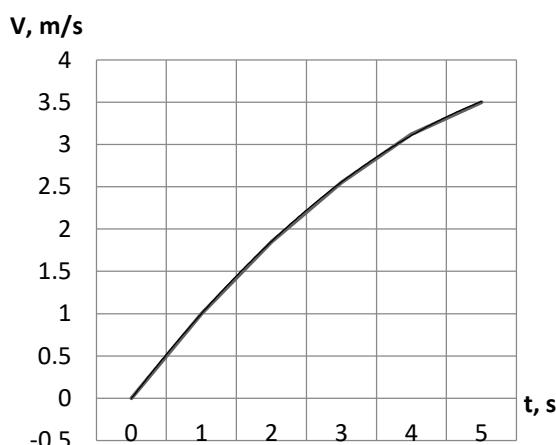
Endirməyə başlama anında, qazmaçı əyləmə momentini azaldır, hələ elevator hərəkətə gəlmir, çünki, şamın yaratdığı kinetik enerji tal sistemi elementlərinin elastiki deformasiyasına (tellərin dərtılmasına) və sürtünmə itkilərini dəf etməyə yönəlir.  $M=M_{st}$  olduqda hərəkət başlayır,  $M=M_{\min}$  olduqda qazmaçı sürətin buraxıla bilən həddən artıq olmasının qarşısını almaq üçün əyləmə qüvvəsini artırmağa çalışır.  $V=V_{\max}$  olduqda  $M=M_{st}$  olur, bu nöqtədən başlayaraq  $M$  artmağa başlayır və  $M=M_{\max}$  olduqda hərəkət dayanır.

**İşin məqsədi** piston effektini nəzərə almaqla qazma alətinin elmi və texniki cəhətdən əsaslandırılmış endirmə rejiminin müəyyən olunmasından ibarətdir. Nəticədə hər bir operatorun endirməni özünə məxsus rejimdə həyata keçirə bilməsinin qarşısı alınar, subyektivlik amili kənarlaşdırılmış olar.

Bunların qarşısını almaq üçün endirilən şamların sayından (quyunun dərinliyindən) asılı olaraq əyləmə qüvvəsinin əsaslandırılmış dəyişmə qanunu müəyyən olunmalıdır. Endirmə rejimlərini təyin etdikdə konstruksiya və texnoloji amillərə ciddi fikir verilməlidir.

Qazma kəməri quyuya endirildikdə yuma mayesinə daldırıldığından hidravlikı müqavimət və sürtünmədən əlavə, quyu ağızına tərəf yönəlmış Arximed qüvvəsinə də məruz qalır. Göründüyü kimi çoxsaylı amillər nəzərə alınmalıdır.

Müxtəlif endirmə qrafiklərinin analizi və qrafiki aproksimasiyası nəticəsində sürətin  $t_1$  müddətinə uyğun gələn dəyişməsi üçün şəkil 2-də təsvir olunan qrafiki asılılıq alınmışdır.



Şəkil 2 -Endirmə zamanı sürətin dəyişmə qrafiki

Figure 2 - Graph of speed change during download

Bu əyrini təsvir edən asılılıq aşağıdakı kimidir ( $R^2 = 1$ ):

$$V = -0.0754t^2 + 1.2292t - 1.156$$

Alınmış ifadənin birinci tərtib törəməsini sıfıra bərabər etsək,  $V_{max} = 8.15 \text{ m/s}$  alınar. Bu sürət çoxdur, ya azdır? Buna yol vermək olar, ya yox? Bu suallara cavab axtardıqda hökmən süxurdağıcı alətlə birlikdə quyuya endirilən qazıma kəmərinin maye içərisində hərəkət edən zaman yaratdığı piston effekti və quyunun parametrləri nəzərə alınmalıdır.

### Məsələnin qoyuluşu

Qazıma alətinin kəmərlə birlikdə quyuya endirilməsi zamanı piston effektinin nəzərə alınmasının xüsusi əhəmiyyəti vardır. Əlverişli şəraitdə, yəni düzgün seçilmiş texnoloji rejimdə piston effekti quyudakı yuma mayesinin lazımi hərəkət sürətini yaratmağa kömək göstərəcək, rejim pozulduqda isə endirmə sürətinə mane olmağa, yaxud yuma mayesinin quyunun bərkidilməmiş zonasında hidravlikı yarılmış tərədərək laya daxil olmasına və beləliklə də mürrəkkəbləşmələr yaratmağa səbəb olacaqdır.

Kəmərin quyudan qaldırılması prosesində isə sürətin düzgün seçilməməsi nəticəsində laydan mayenin sorulması baş verə bilər ki, bu da müəyyən çətinliklər törədə bilər.

Kəmərin quyuya endirilib-qaldırılması zamanı piston effekti xüsusilə nəzəri cəlb edir, çünki kəmərin diametri və uzunluğu elə ölçülərə malikdir ki, quyunun az qala tam həcmini tutur.

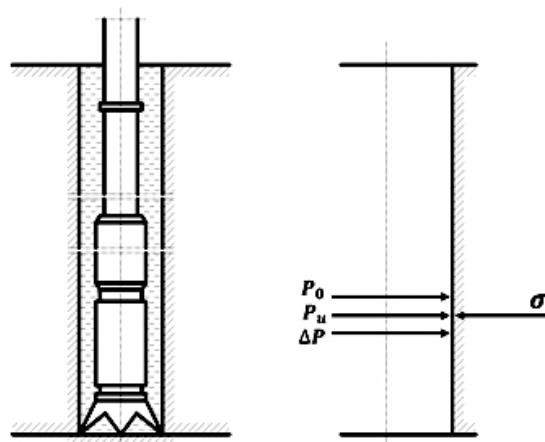
Kəmərin quyuda hərəkəti zamanı qazıma alətinin ön səthində izafî təzyiq və kəmərin sonunda isə seyrəkləşmə (vakuum) yaranır. Bu amillər quyuda əlavə hidravlikı müqavimətlər yaradır və mayenin quyuda hərəkətini təmin edən basqı yaradır.

### Məsələnin həlli

Yuxarıdakıları nəzərə alaraq, qazıma alətinin quyuya endirilməsi prosesində onun buraxıla bilən sürəti quyuda yaranan təzyiqlərin ba-

lans tənliyinə əsaslanmalıdır ki, laylarda hidravlikı yarıılma baş verməsin və məhsuldar horizontun keyfiyyətlə mənimsənilməsi təmin olunsun. Alətin endirilməsi prosesində məsələnin həllini həlqəvi fəzada mayenin hərəkətinin turbulent rejimi halı üçün nəzərdən keçirək.

Quyu lüləsinin hesablama sxemini tərtib edirik (şəkil 3).



Şəkil 3 - Hesablama sxemi

Figure 3 - Calculation scheme

Alətin endirilmə sürəti elə həddə olmalıdır ki, quyuda baş verən proseslərdən lüləni təşkil edən dağ sükurlarının dayanıqlığı təmin olunsun, yəni hidravlikı yarılmış təhlükəsi yaranmasın.

Dayanıqlıq şərtini aşağıdakı kimi tərtib edirik:

$$p_0 + p_e + \Delta p \leq \sigma \quad (1)$$

Burada  $p_0$  – hidrostatik təzyiq,

$$p_e = \gamma H$$

$\gamma$  – yuma mayesinin xüsusi çəkisi;  $H$  – quyunun cari dərinliyi;  $p_e$  – təzyiqin ətalət təşkilicisi

$$p_e = \frac{p_0}{g} \frac{du}{dt}$$

$g$  – sərbəstdüşmə təcili;  $u$  – həlqəvi fəzada yuma mayesinin sürəti;  $\Delta p$  – həlqəvi fəzadakı təzyiqlər fərqi, Darsi-Veysbax düsturuna əsasən təyin olunur:

$$\Delta p = p_0 \frac{\lambda}{2g(D-d)} u^2$$

$\lambda$  – həlqəvi fəzadakı hidravlikı müqavimət əmsalı;  $D$  – quyunun diametri;  $d$  – qazıma borularının xarici diametri;  $\sigma$  – layın hidravlikı yarılmاسının möhkəmlik həddidir.

İfadələrin qiymətlərini (1)-də yerinə yazsaq, alıraq:

$$p_0 + \frac{p_0 du}{g dt} + p_0 \frac{\lambda}{2g(D-d)} u^2 \leq \sigma$$

yaxud

$$\frac{1}{g} \frac{du}{dt} + \frac{\lambda}{2g(D-d)} u^2 \leq \frac{\sigma}{p_0} - 1 \quad (2)$$

Qazıma alətinin endirilmə sürəti ilə mayenin hərəkət sürəti arasındaki əlaqə quydakı mayenin kəsilməzlik şərtindən təyin olunur:

$$\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) u = \frac{\pi}{4} d^2 v$$

Bu ifadədən

$$u = \frac{d^2}{D^2 - d^2} v$$

$u$  – nun qiymətini (2)-də yerinə yazaraq, sadə çevirmələrdən sonra, alıraq:

$$\frac{dv}{dt} = a^2 - b^2 v^2 \quad (3)$$

burada

$$a^2 = \beta \left( \frac{\sigma}{p_0} - 1 \right); \beta = g \frac{D^2 - d^2}{d^2}; b^2 = \frac{\lambda}{2(D-d)} \frac{g}{\beta}$$

(3) ifadəsini dəyişənlərinə ayırsaq, alıraq

$$\frac{dv}{a^2 - b^2 v^2} = dt \quad (4)$$

(4) ifadəsini integralladıqdan sonra

$$\frac{1}{2ab} \ln \left| \frac{a + bv}{a - bv} \right| = t + C$$

İnteqral sabitini məsələnin başlanğıc şərtindən təyin edirik.  $t = 0$  olduqda  $v = 0$  olduğundan  $C = 0$  alınır.

Beləliklə

$$\frac{1}{2ab} \ln \left| \frac{a + bv}{a - bv} \right| = t$$

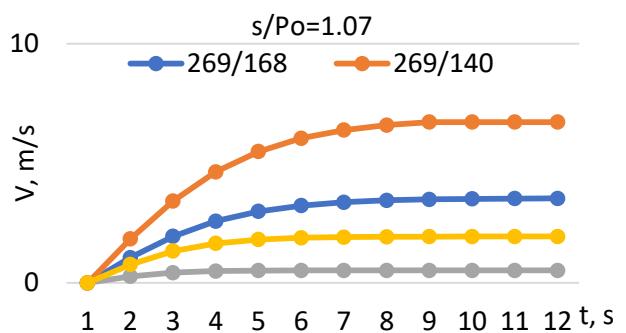
Bəzi çevirmələrdən sonra

$$v = \frac{a}{b} th(abt) \quad (5)$$

Quyu və kəmərin müxtəlif kombinasiyaları üçün alətin quyuya endirilmə sürətinin zaman-dan asılılığı şəkil 4-də təsvir olunmuşdur.

Sərbəst endirilmə və qərarlaşmış hərəkətlə şamın təxminən 85-90% uzunluğu, qalan hissəsi ilə əyləmə qüvvəsinin artırılması ilə hərəkətin tam dayandırılmasına nail olunur.

Ümumi halda hidravlikı müqavimət əmsalı Reynolds parametrindən asılı olaraq dəyişən kəmiyyətdir. Ancaq həlqəvi fəzada mayenin turbulent rejimdə hərəkəti zamanı mövcud sürətlər və yuma mayesinin parametrləri daxilində hidravlikı müqavimət əmsalı demək olar ki, çox kiçik həddə dəyişir və praktiki hesablamar üçün  $\lambda = 0.0276$  qəbul etmək olar.



Şəkil 4 - Alətin quyuya endirilmə sürətinin zamandan asılılığı\*

\*(surətdə quyunun, məhrəcdə kəmərin xarici diametrləri göstərilmişdir)

Figure 4 - Time dependence of tool lowering speed \*

\* (the figure shows the outer diameters of the well, the denominator of the pipe)

Qazıma alətinin bir şam uzunlığında quyuya endirilməsi üçün onun yerdəyişmə qanunu müəyyən etmək üçün alınmış (5) ifadə-sindən istifadə edə bilərik.

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{a}{b} th(abt) \quad (6)$$

Buradan

$$ds = v dt = \frac{a}{b} th(abt) dt \quad (7)$$

İnteqralladıqdan sonra, alıraq;

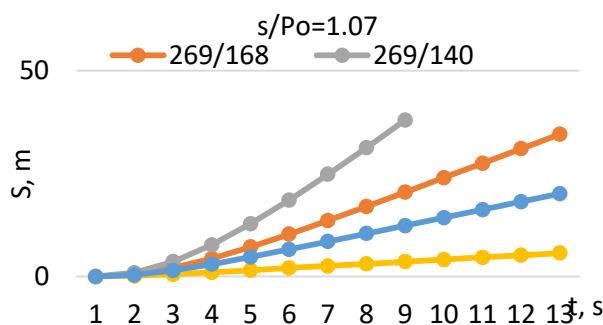
$$S = \frac{1}{b^2} \ln ch(abt) + C_1 \quad (8)$$

Məsələnin başlangıç şərtinə görə  $t = 0$  olduqda  $S = 0$  olduğundan  $C_1 = 0$  alınır.

Şamın yerdəyişmə qanununu aşağıdakı kimi alırıq:

$$S = \frac{1}{b^2} \ln ch(abt) \quad (9)$$

Müxtəlif kombinasiyalar üçün şamın yerdəyişməsinin zamandan asılılığı şəkil 5-də göstərilmişdir.



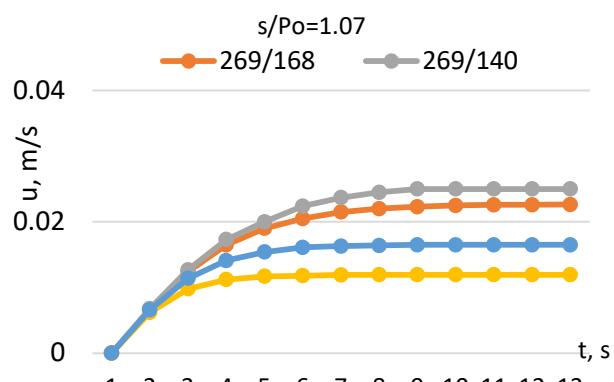
Şəkil 5 - Şamın yerdəyişməsinin zamandan asılılığı  
Figure 5 - Time dependence of candle displacement

**Həllin müzakirəsi.** 269/140 və 269/168 kombinasiyaları üçün müvafiq olaraq 8 və 12 saniyə müddətində təhlükəsiz endirilmə uzunluğuna nail olunur, 168/140 variantı üçün yol verilən sürət kiçik olduğundan bu müddət uzanır. Buna görə də bu varianta üstünlük verilmir.

Həlqəvi fəzada yuma mayesinin hərəkət sürətini təyin edirik. Bunun üçün mayenin kəsilməzlik şərtinə istinad edərək,  $v$  -nın qymətini yerinə yazmaq kifayətdir.

$$u = \frac{d^2}{D^2 - d^2} v = \frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot \frac{a}{b} th(abt) \quad (10)$$

Həlqəvi fəzada mayenin qalxma sürətinin zamandan asılılığı şəkil 6-da təsvir edilmişdir.



Şəkil 6 - Mayenin qalxma sürətinin zamandan asılılığı  
Figure 6 - Time dependence of the rate of rise of the liquid

Şəkildən aydın olur ki, həlqəvi fəzanın en kəsik sahəsi böyük olduğu kombinasiyalarda mayenin hərəkət sürəti daha böyük olur. Bu sürət mayenin kəsilməzlik şərtindən təyin olunduğu üçün qazılmış və mayeyə daldırılmış süxurların yer səthinə qaldırılması təmin oluna caqdır.

Süxurların müəyyən möhkəmliyində və baxılan dərinlikdə  $\sigma/p_0$  kəmiyyətinin idarə olunması yuma mayesinin xüsusi çekisinin dəyişdirilməsi (azaldılması yaxud artırılması) hesabına tənzimlənə bilər (şəkil 7). Bu kəmiyyətin artırılması ilə alətin təhlükəsiz hərəkət sürətini artırmaq olar.

Şəkildən aydın olur ki, yuma məhlulunun xüsusi çekisini tənzimləməklə ( $p_0$ -ı azaltmaqla) sürətin qiymətini 269/140, 269/168 və 168/140 kombinasiyaları üçün müvafiq olaraq 5; 4.7 və 3.7 dəfəyə qədər artırmaq mümkündür. Bu halda layın hidravlikı yarıılma təhlükəsi gözlənilmiş olacaqdır.

$\frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot \frac{a}{b} = k$  qəbul edərək (10) ifadəsini differentiallaşsaq, həlqəvi fəzada mayenin hansı təcillə hərəkət edəcəyini müəyyənləşdirə bilərik.

$$\frac{du}{dt} = [kth(abt)]' \quad (11)$$

Bəzi sadə çevirmələrdən sonra, alırıq  

$$\frac{du}{dt} = kab \operatorname{sech}^2(abt) \quad (12)$$

$k$  -nın qiymətini yerinə yazaraq təzyiqin yuxarıda qeyd olunan ətalət təşkiledicisi üçün ifadə almış olarıq

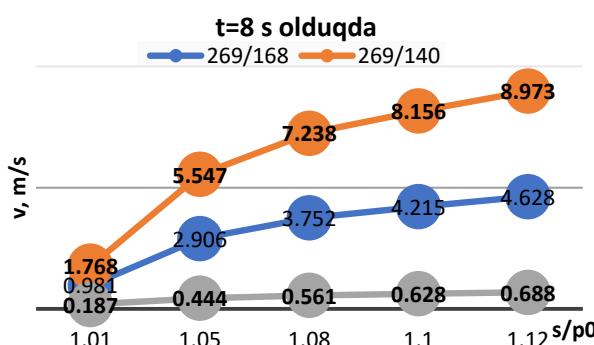
$$p_e = \frac{p_0}{g} \frac{du}{dt} = \frac{p_0}{g} \cdot kab \operatorname{sech}^2(abt) =$$

$$= \frac{p_0}{g} \cdot \frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot a^2 \operatorname{sech}^2(abt)$$

$a^2$  üçün olan ifadəni də nəzərə alsaq,

$$a^2 = \beta \left( \frac{\sigma}{p_0} - 1 \right) = g \frac{D^2 - d^2}{d^2} \left( \frac{\sigma}{p_0} - 1 \right)$$

$$p_e = \gamma H \left( \frac{\sigma}{p_0} - 1 \right) \operatorname{sech}^2(abt) \quad (13)$$



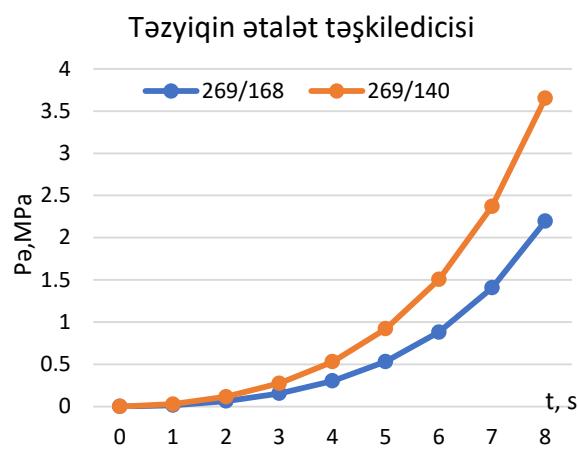
Şəkil 7 - Alətin endirilmə sürətinin  $\sigma/p_0$  kəmiyyətindən asılılığı

Figure 7 - Dependence of tool lowering speed on  $\sigma/p_0$

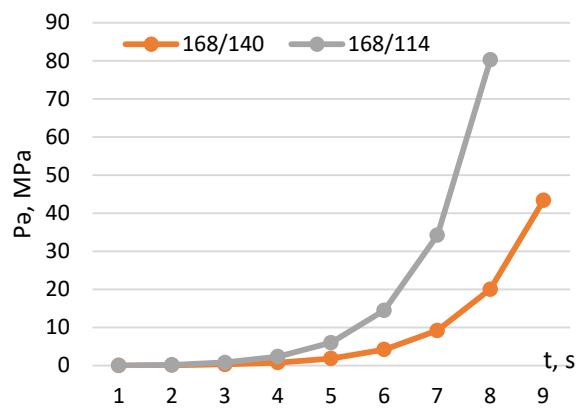
(13) düsturundan görünür ki, qazima alətinin kəmərlə birlikdə hərəkəti zamanı yaranan təzyiqin ətalət təşkiledicisi (piston effektini yaradan əsas səbəb) quyunun və kəmərin diametrindən, hidravlikı müqavimət əmsalından, yuma mayesinin xüsusi çökisindən, şamın endirilmə dərinliyindən və qazılan dağ süxurunun mexaniki xassələrindən asılı olaraq dəyişilir. Bunun qrafiki təsviri şəkil 8-də verilmişdir.

Şəkil 8-dən görünür ki, şamın sərbəst endirilməsi zamanı (əyləmə momenti tətbiq olunana qədər) təzyiqin ətalət təşkiledicisi sürətin maksimuma catdığı ana qədər yüksəlir, prose-

sin sonunda piston effekti öz təsirini daha güclü göstərməyə başlayır. Onun dağıdıcı təsirini azaltmaq üçün endirmə sürətinin tənzimlənməsinə ehtiyac yaranır. Ona görə də müəyyən qazima dərinliyindən sonra (adətən 19-20 şamdan başlayaraq) köməkçi əyləclərin işə qoşulması zərurəti yaranır. Bu halda əsas əyləcin yüklenməsi azalır və avadanlıqlar pasport pejiminə uyğun işləyirlər. Belə olduqda onların işləmə qabiliyyətləri, uzunömürlük göstəriciləri və xidmət müddətləri təmin olunur.



Təzyiqin ətalət təşkiledicisi



Şəkil 8 - Qazima alətinin kəmərlə birlikdə hərəkəti zamanı yaranan təzyiqin ətalət təşkiledicisinin endirilmə müddətindən asılılığı

Figure 8 - Dependence of the pressure generated during the movement of the drilling tool with the belt on the unloading time of the inertia organizer

## Nəticə.

Qazıma alətinin endirilməsi prosesində quyuda təzyiqlərin balans tənliyinə əsaslanaraq, endirmə sürəti üçün qanuna uyğunluqlar müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, quyunun diametri ilə boru kəmərinin xarici diametrleri arasındakı kombinasiyadan asılı olaraq piston effektinin təsiri müxtəlifdir. Diametrlər arasında fərq azaldıqca piston effektinin təsiri güclənir.

Şamın sərbəst endirilən uzunluğuna uyğun gələn sürətlərin təhlükəsiz qiymətləri və həlqə-

vi fəzada yuma mayesinin hərəkət sürətləri müəyyən olunmuşdur.

Göstərilmişdir ki, qazıma alətinin kəmərlə birlikdə hərəkəti zamanı yaranan təzyiqin ətalət təşkiledicisi (piston effektini yaradan əsas səbəb) quyunun və kəmərin diametrindən, hidravlikı müqavimət əmsalından, yuma mayesinin xüsusi çəkisindən, şamın endirilmə dərinliyindən və qazılan dağ süxurunun mexaniki xassələrindən asılı olaraq dəyişilir.

Alınmış nəticələri müasir qazıma qurğularının program təminatında nəzərə alaraq, onları asanlıqla reallaşdırmaq mümkündür.

## REFERENCES

1. **Aliyev A.M.** Raschet podema burilnoqo instrumenta iz skvajini s uchetom oqranicheniya skorosti dvijeniya // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2010, t.2. – S. 62-74 (in Russian)
2. **Aliyev A.M.** Razrabotka system upravleniya spuska burilnoqo instrumenta v skvajinu tritelstvo neftyanix I qazovix skvajin na sushi I na more. Moskva: VNIIOPENQ, No 10, 2010, S. 13-15 (in Russian)
3. **Vinitckiy M.M.** Ratsionalnoe upravleniye spusko-podemnimi operatsiyami. Moskva: Nedra, 1978. - 252 s. (in Russian)
4. **Janahmadov A.Kh.** Neftyanaya triboloqiya. Baku: Elm, 2003. - 326 s. (in Russian)
5. **Tsuprikov A.A., Yakimenko K.Yu.** Metod qidrodinamicheskogo davleniya v skabajne pri spusko-podemnih operatsiyax. *Nauchniy jurnal KubQAU*, No 82(08), 2012 (in Russian)  
<http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/56.pdf>

Received: 17.07.2020  
Revised: 12.06.2021  
Accepted: 19.06.2021

## The Effect of the Pressure on the Discharge of Multiphase Oil Pipeline

**F.B. Ismayilova, E.Kh. Iskandarov**

*Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig avenue, 34, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Iskandarov Elman / e-mail: e.iskenderov62@mail.ru

**Abstract**

In the article, it was attempted to model laminar and turbulent flows for multiphase mixtures at different pressure values, taking into account changes in the degree of compression. Taking into account the nature of the pressure drop along the pipeline, mathematical expressions characterizing the pressure-dependent variation of flow in the pipeline for laminar and turbulent flows have been obtained. Analysis of the obtained expressions showed that the impact of pressure on the discharge of oil pipelines in both turbulent and laminar modes of multiphase flows is quite high, and this effect can increase up to 60%, depending on the average pressure in the pipeline.

**Keywords:** pressure, compression, multiphase, flow rate of the mixture, viscosity, flow regime, joint gathering.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_78\_83

**For citation:**

*Ismayılova F.B., Iskandarov E.Kh.*

[The Effect of the Pressure on the Discharge of Multiphase Oil Pipeline]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2, Pp. 78 – 83 (in Azerbaijan).

## Təzyiqin multifazalı neft kəmərinin buraxma qabiliyyətinə təsiri haqqında

F.B. İsmayılova, E.X. İskəndərov

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq prospekti 34, Bakı şəhəri, AZ1010, Azərbaycan)

### Yazışma üçün:

İskəndərov Elman / e-mail: e.iskenderov62@mail.ru

### **Annotasiya**

Məqalədə sıxılma dərəcəsinin dəyişmələrini nəzərə almaqla və təzyiqin müxtəlif qiymətlərində multifazalı qarışqlar üçün laminar və turbulent axınların modelləşdirilməsinə cəhd edilmişdir. Boru kəməri boyu təzyiqin azalmasının xüsusiyyəti nəzərə alınmaqla laminar və turbulent axınlar üçün boru kəmərində sərfin təzyiqdən asılı olaraq dəyişməsini xarakterizə edən riyazi ifadələr alınmışdır. Alınmış ifadələrin təhlili göstərmişdir ki, multifazlı axınların həm turbulent, həm də laminar rejimlərində təzyiqin qiymətinin neft kəmərlərinin buraxma qabiliyyətinə təsiri kifayət qədər böyükdür və bu təsir boru kəmərlərində orta təzyiqin qiymətindən asılı olaraq, 60 %-ə qədər yüksələ bilər.

**Açar sözlər:** təzyiq, sıxılma, mültifaza, qarışığın sərfi, ozlülük, hərəkət rejimi, birgə yiğim.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_78\_83

---

**УДК:** 622.691.4.052.012

## О влиянии давления на пропускную способность мультифазных трубопроводов

**Ф.Б. Исмайилова, Э.Х. Искендеров**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности  
(пр. Азадлыг, 34, Баку, AZ1010, Азербайджан)*

### Для переписки:

Искендеров Эльман / e-mail: e.iskenderov62@mail.ru

### **Аннотация**

В статье сделана попытка смоделировать течения мультифазных смесей при ламинарных и турбулентных режимах с учетом изменения степени сжимаемости и при разных уровнях давлений. С учетом характера изменений давления в системе были получены зависимости расхода смеси от уровня давления для ламинарных и турбулентных течений. Анализ полученных формул показал, что влияние уровня давления на пропускную способность нефтепроводов как в турбулентном, так и в ламинарном режимах мультифазных потоков довольно велико и в зависимости от уровня среднего давления в трубопроводе может возрастать до 60%.

**Ключевые слова:** давление, сжимаемость, мультифаза, расход смеси, вязкость, режимы движения, совместный сбор.

## Giriş

Məlum olduğu kimi, neftin, qazın hasilat və yiğim sistemlərinin yataqların istismar səmərəliyinə təsiri böyük əhəmiyyət kəsb edir. Çünkü əsas enerji və sərvət məsrəfləri, həmçinin ətraf mühitin ekoloji durumuna mənfi təsir göstərən əksər qəza və mürəkkəbləşmələr məhz bu sistemlərdə baş verir. Təcrübələr göstərir ki, hasilat quyularının və neft-yiğim sistemlərinin istismar göstəricilərində əksər hallarda hesablanmış (layihə) qiymətlərindən kənarlaşmalar baş verir [1,2]. Ona görə də, mədənlərin abadlaşdırılma sistemlərinin optimallaşdırılması neft və neft (səmt) qazlarının hasilatının səmərəliyini artırır. Quyu məhsulunun keyfiyyət göstəricilərini qorumaqla, karbohidrogen xammalının itkilərinin azaldılması üçün əsas istiqamətlərdən biri olan birgə yiğim texnologiyalarının tətbiqi ilə quyuların istismara verilməsi də sürtənlər. Belə ki, abadlaşdırma sistemində gücləndirici nasos stansiyalarından öndə separasiya qurğuları və yiğim qaz kəmərləri qoşulmur. Mədən obyektlərinin kifayət qədər köhnəldiyi, işlənmənin son mərhələlərində isə onların əksər hissəsi böyük istismar xərcləri hesabına yenisini ilə əvəz olunur, yüksək sulaşma səbəbindən neft hasilatının maya dəyəri yüksəlir. Birgə nəqli həyata keçirməklə isə xərclərin azaldılmasına (optimallaşdırılmasına) nail olmaq mümkündür.

Quyu məhsulunun neft qazının ayrılmadan birgə yiğilmasını elektrik mərkəzdənqəçmə nasosları, ejektorlar, boru tipli separatorlar və s. ilə təchiz edilmiş gücləndirici nasos stansiyalarının tətbiqi ilə həyata keçirmək olar. Bu zaman quyuagızında təzyiqin qaldırılması tələb olunmur. Bu təzyiqin qalxması ilə quyu məhsulunun separator və nasoslarının tətbiqi olmadan quyulardan mədən yığın məntəqlərinə birgə nəqlini həyata keçirmək mümkündür [2,3].

Belə texnologianın tətbiqi üçün aşağıdakı məsələlərin həlli tələb olunur:

- multifazalı sistemin (qazı qabaqcadan ayırmadan) quyular qrupundan (yataq sahəsindən) yiğim məntəqəsinə nəqli üçün neft-qaz qarışığının boru kəmərinin başlangıcında minimal zəruri təzyiqin qiymətinin təyini;
- baxılan mədən sahəsi üçün hasilat quyularında quyuagızı təzyiqin qiymətinin qaldırılmasını nəzərə almaqla multifazalı texnologiyaların texniki-iqtisadi təminatı.

Beləliklə, quyu məhsullarının (neftin, qazın və suyun) birgə səmərəli yiğilmasının mühüm şərtlərdən biri təzyiq amili ilə bağlıdır. Söz-süz ki, təzyiqin doyma təzyiqində ( $P_d$ ) yuxarı qiymətlərində boru kəmərində hərəkət edən qarışq bircinsli, yəni homogen qarışq olacaqdır. Təzyiqin aşağı qiymətlərində, yəni  $P < P_d$  oludurda sistemdə 2-ci qaz fazasının mövcudluğu hesabına heterogen sistem yaranacaqdır. Bu cür sistemlərdə sərbəst şəkildə qaz fazasının mövcudluğu və bu fazanın təzyiqdən asılı olaraq fiziki-kimyəvi xassələrinin dəyişməsi qəcilməzdir. Bu cür sistemlərin boru kəmərlərində hərəkəti məsələlərinə, sərfin təzyiq və temperaturdan asılı olaraq qarışığın sıxlığı və həcmi sürətinin dəyişməsini təsdiqləyən xeyli sayda nəzəri və təcrübi tədqiqatlar mövcuddur.

Neft-qaz, qaz-kondensat qarışıqlarının boru kəmərləri ilə nəqli zamanı, hətta sistemin bircinsliyi qəbul olunduğu şərtlər daxilində belə həmin sistemlərin özlərini yeni keyfiyyət göstəricilərinə malik olan, relaksasiya xüsusiyyətli sistemlər kimi biruzə verməsi müəyyən edilmişdir [4-8].

Multifazal qarışıqların hərəkəti zamanı təzyiqin müxtəlif qiymətlərində qaz rüseymlərinin əmələ gəlmə təzahürünün nəzərə alınması və onların texnoloji proseslərdə tətbiqi məsələləri

ilə akademik A.X. Mirzəcanzadənin rəhbərliyi ilə çoxlu tədqiqatlar aparılmışdır.

Təqdim olunan işdə qeyd olunan sistemlərdə yaranan mikro rüşeymlərin (olduqca kiçik qaz hissəciklərinin) hesabına sistemin sıxılma xüsusiyyətinin dəyişməsinə təzyiqin səviyyəsinin necə təsir etməsi məsələləri araşdırılmışdır.

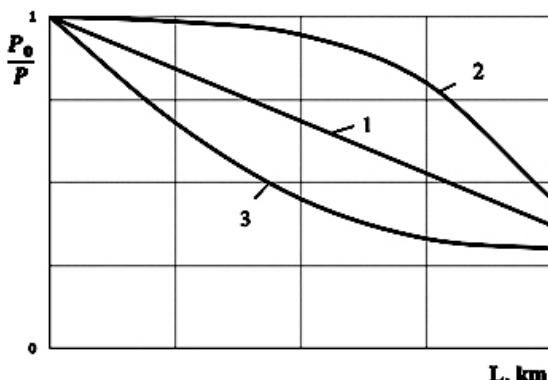
Yuxarıda qeyd edilənlər əsasında qaz rüşeymlərinin dəyişmələrini (sıxılma dərəcəsini) nəzərə almaqla təzyiqin müxtəlif qiymətlərində multifazalı qarışqlar üçün axının modelləşdirilməsinə cəhd edilmişdir. Bu məqsədlə əsas kimi, təzyiqin qazla doymuş mühitin özlülüyünə təsiri üçün tədqiqatlar nəticəsində alınmış aşağıdakı asılılıq qəbul edilmişdir.

$$v = v_0(1 + \alpha P) \quad (1)$$

Burada:  $v_0$ -normal şəraitdə ( $T=0^{\circ}$  C,  $P=1\text{ atm.}$ ) qarışığın kinematik özlülüyü;  $P$ -təzyiq;  $\alpha$ - təzyiqinin 1 atm. qalxması ilə özlülük əmsalinin özünün ilkin qiymətinə ( $v_0$ ) görə neçə dəfə arta bilməsini göstərən əmsaldır.

### Nəzəri tədqiqat

Multifazalı sistemlər üçün boru kəmərinin uzunluğu boyu təzyiqin paylanması, müəyən mənada şəkil 1-də göstərilən kimi təsəvvür etmək olar [1,2].



1-3- təzyiqin uyğun olaraq neft, qaz və multifazalı kəmərdə paylanması

Şəkil 1 – Boru kəmərində təzyiqin axın boyu paylanması

Figure 1 – Pressure distribution in pipeline

Əgər  $dP/dx = \rho gh/\ell$  qəbul etsək, (1) və ümumiləşdirilmiş Leybenzon ifadələrinə görə alarıq:

$$-\frac{dP}{dx} = B(1 + \alpha P)^m \quad (2)$$

Burada:

$B = \frac{\rho A}{2} \left(\frac{4}{\pi}\right)^{2-m} \cdot \frac{Q^{2-m}}{D^{5-m}} \cdot v_0^m$ ;  $m$  və  $A$ -axın rejimlərini xarakterizə edən sabit kəmiyyətlər;  $D$ - boru kəmərinin diametri;  $Q$ -boru kəmərində qarışığın sərfidir.

$$C = (1 + \alpha P_0)^{\frac{m-1}{m}}$$

olduğunu nəzərə alsaq, (2) bərabərliyinə əsasən təzyiqin dəyişmə qanunu aşağıdakı kimi olacaqdır:

$$(1 + \alpha P)^{\frac{m-1}{m}} = -\frac{m-1}{m} \cdot X \cdot \alpha \cdot B + (1 + \alpha P_0)^{\frac{m-1}{m}} \quad (3)$$

Qəbul olunur ki, diametri  $D$ , uzunluğu  $\ell$  olan boruya  $P_0$  başlanğıc təzyiqlə qazla doymuş maye daxil olur. Təzyiqin düşməsi ilə sistemdə qaz qabarcıqları əmələ gəlməyə başlayır və onların qarışqda qatılığı intensiv şəkildə artır. Borunun sonunda ( $x=\ell$ )  $P=P_s$  qəbul etmək olar ki, bu zaman son təzyiq ( $P_s$ ) atmosfer təzyiqinə bərabər ola bilər. Qeyd olunanları nəzərə alsaq, (3) bərabərliyi aşağıdakı kimi olacaqdır:

$$(1 + \alpha P_s)^{\frac{m-1}{m}} = -\frac{m-1}{m} \cdot \alpha \cdot \ell \cdot B + (1 + \alpha P_0)^{\frac{m-1}{m}} \quad (4)$$

(3) və (4) ikihəndlilərini Binom qaydası ilə sıraya ayırsaq və  $\alpha$ -nın ikinci tərtibdə yuxarı həddlərini nəzərə almasaq onda:

$$(1 + \alpha P_s)^{\frac{m-1}{m}} \approx 1 + \frac{m-1}{m} \cdot \alpha \cdot P_s - \frac{\frac{m-1}{m} \cdot \frac{1}{m} \alpha^2 P_s^2}{2}$$

$$(1 + \alpha P_0)^{\frac{m-1}{m}} \approx 1 + \frac{m-1}{m} \cdot \alpha \cdot P_0 - \frac{\frac{m-1}{m} \cdot \frac{1}{m} \alpha^2 P_0^2}{2}$$

Sadə çevrilmələrdən sonra  $B$ -ni tapmaq üçün aşağıdakı bərabərliyi yazmaq mümkündür:

$$B = \frac{P_0 - P_s}{2} - \frac{\alpha}{2m\ell} (P_0^2 - P_s^2)$$

Yuxarıda qeyd olunanları nəzərə almaqla maye axınının həm laminar, həm də turbulent rejimlərində sərfin qiymətini aşağıdakı ifadədən tapmaq olar:

$$Q = Q_0 \left[ 1 - \frac{\alpha(P_0 + P_s)}{2m} \right]^{\frac{1}{2-m}} \quad (5)$$

Burada:

$$Q_0 = \frac{\pi D^{\frac{5-m}{2-m}} [(P_0 - P_s)/2]^{\frac{1}{2-m}}}{\rho \frac{A}{2} \left(\frac{4}{\pi}\right)^{\frac{1}{2-m}} v_0^m}$$

$Q_0$  - kinematik özlülüyün ( $v_0$ ) sabit qiymətində mayenin sərfidir.

Yuxarıda şərh olunan tədqiqatlara əsasən mühitin sıxılmasının dəyişmələrini ( $\alpha$ ) nəzərə almaqla, axının müxtəlif rejimləri üçün sərfin artma tempini ( $Q/Q_0$ ) qiymətləndirmək olar. Tədqiqatların nəticələri göstərmişdir ki, qazla doymuş mühitin sıxılmasını orta hesabla  $\alpha \approx -10^{-7} Pa^{-1}$  qəbul etmək olar [7].

(5) ifadəsinə əsasən axının laminar ( $m=1$ ) və turbulent ( $m=0,25$ ) rejimlərində sərfin qiymətinin hesablanması üçün uyğun olaraq aşağıdakı ifadələri yazmaq olar:

$$Q_{lam} = Q_0^{lam} \left[ 1 - \frac{\alpha(P_0 + P_s)}{2} \right] \quad (6)$$

$$Q_{tur} = Q_0^{tur} \left[ 1 - \frac{4\alpha(P_0 + P_s)}{2} \right]^{\frac{4}{7}} \quad (7)$$

Multifazalı qarışqlarda təzyiqin sərfə təsirini qiymətləndirmək məqsədi ilə sonuncu ifadələrə əsasən müxtəlif hallar üçün qiymətləndirmə və hesablamalar aparmaqla axının la-

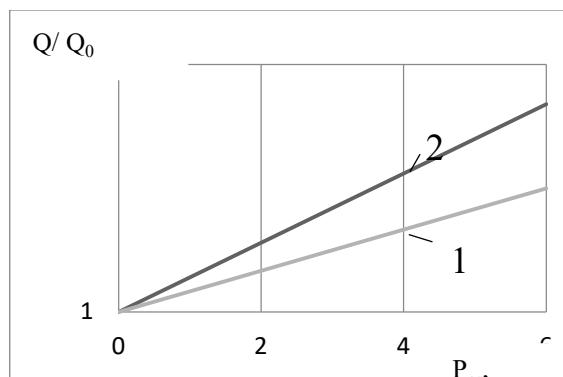
minar və turbulent rejimlərində sərfin artma tempinin qiymətləndirilməsi üçün yekun ifadəni aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$Q_{lam}/Q_0^{lam} = 1 - \alpha P_{or} \quad (8)$$

$$Q_{tur}/Q_0^{tur} = (1 - 4\alpha P_{or})^{\frac{4}{7}} \quad (9)$$

Burada:  $P_{or} = (P_0 + P_s)/2$ - orta təzyiqdir.

Sonuncu (8) və (9) ifadələrinə əsasən orta təzyiqin müxtəlif qiymətlərində hesablamalar aparılmış və həm laminar, həm də turbulent (hamar sürtünmə zonası) hərəkət rejimləri üçün sərfin necə dəyişməsi müəyyənləşdirilmişdir. Təzyiqdən asılı olaraq müxtəlif rejimlərdə sərflərin nisbətinin necə dəyişməsi şəkil 2-də göstərilmişdir.



1 və 2 uyğun olaraq laminar və turbulent axınlar üçün

Şəkil 2 – Axının müxtəlif rejimlərində təzyiqin sərfə təsiri

Figure 2 – Impact of pressure on flow rate at different flow regimes

Şəkil 2-dən göründüyü kimi, həm turbulent, həm də laminar axın rejimlərində təzyiqin mayenin sərfinə təsiri kifayət qədər böyükdür. Məsələn orta təzyiqin ( $P_{or}$ ) qiymətindən asılı olaraq, real boru kəmərlərində qarışığın sərfinin 60%-ə qədər artması mümkündür.

## Nəticə

Bələliklə, müəyyən edilmişdir ki, multifa-

zalı boru kəmərində təzyiqin səviyyəsinin kə-

mərin buraxma qabiliyyətinə (qarışığın sərfinə)

təsiri əhəmiyyətli dərəcədədir. Müəyyən edil-

mişdir ki, istər laminar, istərsə də turbulent

axınlarda boru kəmərində olan orta təzyiqdən

asılı olaraq multifazalı qarışığın sərfi xeyli də-

yışə bilir. Belə ki, real boru kəmərləri üçün təz-

yiqin artması ilə qarışığın sərfinin 50 – 60 %-ə

qədər çoxalması mümkündür.

## REFERENCES

1. Aliev R.A, Belousov V.D. i dr. Truboprovodnyj transprot nefti i gaza. M.: Nedra, 1988, 368s. (*in Russia*)
2. Lutoshkin G.S. Sbor i podgotovka nefti, gaza i vody. M.: Nedra, 1983, 224s. (*in Russia*)
3. Mamaev V.A., Odishariya G.E., Klapchuk O.V. i dr. Dvizhenie gazozhidkostnyh smesej v trubah. M.: Nedra, 1978, 272 s. (*in Russia*)
4. Mamedzade A.M., Mamedzade R.V., Melikov G.H., Salavatov T.Sh. Ob effekte zarodyshe obrazovanie v geterogenykh sredah i primenenie ego v neftedobyche // Nefiqazçixarma proseslərinin optimallaşdırılması. Elmi əsərlər toplusu. Bakı, 1987, s.11-17. (*in Russia*)
5. Sattarov R.M., Farzane P.Ya. Issledovanie dvizheniya gazozhidkostnyh sistem s uchetom obrazovaniya mikrozarodyshej // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 1987, №5, s. 765-771. (*in Russia*)
6. Lejbenzon L.S. Sobranie trudov. SSRİ Elmlər Akademiyasının nəşri. 1955. (*in Russia*)
7. Mirzadzhanzade A.H., Maksudov F.G., Nigmatulin R.I. i dr. Teoriya i praktika primeneniya neravnovesnyh sistem v neftegazdobycze. Bakı: Elm, 1985. (*in Russia*)
8. Mirələmov H.F., İskəndərov E.X. Enerjiyə qənaətli texnologiyaların tətbiqi ilə qaz nəzarət-ölçü sisteminin tək-milləşdirilməsi haqqında // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının xəbərləri, 2017, Cild 9, № 4, s. 50-54. (*in Azeri*)

Redaksiyaya daxil olub: 30.03.2020

Tamamlama işlərindən sonra: 12.06.2021

Nəşrə qəbul edilib: 18.06.2021

## Polymer Composition Based on Spent Low Density Polyethylene and Limestone of Dashsalakhly Deposit

**R.Sh. Alkhanov<sup>1</sup>, M.D. Rajabova<sup>1</sup>, V.D. Jafarov<sup>1</sup>, M.T. Sharifova<sup>2</sup>,  
E.M. Hajieva<sup>2</sup>, M.I. Mammadova<sup>2</sup>, Z.A. Aslanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Polymer Materials of ANAS (Sumqayıt, S.Vurgun str., 124, Azerbaijan)

<sup>2</sup> Ganja Branch of ANAS (Ganja, H.Aliyev str., 419, Azerbaijan)

**For correspondence:**

Jafarov Valeh / e-mail: valeh\_ani@mail.ru

**Abstract**

Composite material was obtained by recycling household low polyethylene and limestone of Dashsalakhly deposit Gazakh district of the Republic of Azerbaijan. The fractional, chemical and mineralogical compositions of the filler were studied, as well physical and chemical properties. Based on the analysis of the data obtained, was investigated the possibility of obtaining a composite material using household polymer waste and this filler. Utilization of wastes helps to that, although with economic first raw material for reconstruction of ecological balance in the region.

**Keywords:** household waste, filler, recycling, physical and chemical properties, application

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_84\_88

**For citation:**

Alkhanov R.Sh. et al.

[Polymer Composition Based on Spent Low Density Polyethylene and Limestone of Dashsalakhly Deposit]  
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 84 – 88 (in Russian).

## İşlənilmiş aşağı sıxlıqlı polietilen və Daşsalahlı yatağı əhəngdaşı əsasında polimer kompozisiyası

R.Ş. Alxanov<sup>1</sup>, M.C. Rəcəbova<sup>1</sup>, V.C. Cəfərov<sup>1</sup>, M.T. Şərifova<sup>2</sup>,  
E.M. Hacıyeva<sup>2</sup>, M.İ. Məmmədova<sup>2</sup>, Z.A. Aslanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AMEA Polimer Materialları Institutu (Sumqayıt ş. S.Vurğun küç., 124, Azərbaycan)

<sup>2</sup> AMEA Gəncə Bölməsi, Gəncə ş, H.Əliyev pr., 419, Azərbaycan)

### Yazışma üçün:

Cəfərov Valeh / e-mail: valeh\_ani@mail.ru

### **Annotasiya**

İşlənilmiş aşağı sıxlıqlı polietilen və Qazax rayonu Daşsalahlı yatağı əhəngdaşı tullantısından təkrar emal üsulu ilə kompozisiya materialı alınıb. Doldurucu kimi istifadə olunan əhəngdaşı tullantısının fraksiya–kimyəvi və mineraloji tərkibləri, həmçinin onun fiziki-mexaniki xassələri tədqiq olunub. Alınan nəticələr əsasında polimer atqısından və qeyd olunan doldurucudan istifadə etməklə kompozisiya materialı alınması imkanı tədqiq edilib. Tullantıların təkrar emalı ilkin xammala qənaət etməklə yanaşı, Qərb regionunun ekoloji tarazlığının saxlanılmasına imkan yaranır.

**Açar sözlər:** polimer atqısı, doldurucu, təkrar emal, fiziki-mexaniki xassələri, tətbiq.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_84\_88

---

УДК 541.678.046

## Полимерная композиция на основе отработанного полиэтилена низкой плотности и известняка Дашсалахлинского месторождения

Р.Ш. Алханов<sup>1</sup>, М.Д. Раджабова<sup>1</sup>, В.Д. Джапаров<sup>1</sup>, М.Т. Шарифова<sup>2</sup>,  
Э.М. Гаджиева<sup>2</sup>, М.И. Мамедова<sup>2</sup>, З.А. Асланова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт полимерных материалов НАНА, г. Сумгайыт, ул. С.Вургана, 124, Азербайджан)

<sup>2</sup> Гянджинское отделение НАНА (г. Гянджа, пр. Г.Алиева, 419, Азербайджан)

### Для переписки:

Джапаров Валех / e-mail: valeh\_ani@mail.ru

### **Аннотация**

Получен композиционный материал повторной переработкой отработанного полиэтилена низкой плотности и известняка Дашсалахлинского месторождения Казахского района Азербайджанской Республики. Изучены фракционный, химический и минерологический составы наполнителя, а также его физико-механические свойства. На основании анализа полученных данных исследована возможность получения композиционного материала с использованием полимерного отхода и данного наполнителя. Утилизация отходов способствует, наряду с экономией первичного сырья, восстановлению экологического равновесия в регионе.

**Ключевые слова:** полимерный отход, наполнитель, вторичная переработка, физико-механические свойства, применение

## Введение

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим упругим, прочностным и другим свойствам традиционные. Полимерные материалы относятся к числу наиболее перспективных, интересных и ценных, и в особенности, наполненные материалы.

В данное время получение полимерных материалов с высокими физико-механическими свойствами и равномерным распределением наполнителя в полимерной матрице является весьма актуальной задачей.

В этой связи создание наполненных полимерных материалов с использованием минеральных наполнителей представляет большой научный и практический интерес [1].

Как известно, ежегодно во всем мире наращивается объем производства различных полимеров, используемых в народном хозяйстве [2]. Именно эти полимеры, используемые в быту и имеющие широкое распространение, являются на сегодняшний день интенсивными загрязнителями окружающей среды. Каждый полимер имеет свой ресурс вторичной переработки, по истечении которого становится непригодным для дальнейшего использования и подлежит утилизации. Одним из способов утилизации отработанного полимера является его модификация с использованием различных минеральных наполнителей с целью применения для производства изделий технического назначения и оздоровления окружающей среды.

**Цель работы** – создание полимерной композиции с улучшенными эксплуатационными свойствами на основе отработанного полиэтилена низкой плотности и известняка Дашибалхинского месторождения Каражского района Азербайджанской Республики в качестве минерального наполнителя.

## Постановка задачи

Представленная статья посвящена исследованию получения полимерного композиционного материала с улучшенными физико-механическими свойствами на основе отработанного полимерного отхода и известняка.

## Решение задачи

Изучены фракционный, химический, минералогический составы, физико-механические свойства известняка и композиции (таблицы 1, 2, 3, 4, 5).

**Таблица 1.** Фракционный состав известняка  
**Table 1.** Fraction composition of lime

Название материала	Фракционный состав, %						
	Размеры сита, мкм	50	50-63	100-160	160-200	200-250	250-315
Известняк Дашибалхинского месторождения		5,88	9,51	17,04	24,40	13,46	29,71

Разделение порошка минерального наполнителя осуществлялось путём просеивания (марка сита «ЕНДА ЕТС 1410»)

**Таблица 2.** Физико-механические свойства известняка  
**Table 2.** Physical-mechanical properties of lime

Название материала	Модуль крупности, %	Объёмный вес, г/см <sup>3</sup>	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Водо -поглощение, %	Пористость, %	Влажность, %	Насыпная плотность, %	Потери при прокаливании, %
Известняк Дашибалхинского месторождения	3,85	1,17	1,4	1,23	18,0	17,0	2,56	11,14	1,13

Анализ данных таблицы 2 показывает, что данный материал можно отнести к классу тяжелых камней, рекомендуемых для применения в качестве наполнителя при получении композиционного материала технического назначения.

Свойства наполнителя исследованы известными методами анализа, согласно ГОСТ-ов 8735-65 и 5382-23 [3-5].

Далее исследованы химический и минералогический составы известняка. Как известно, химический состав это один из важнейших показателей качества вещества.

В лаборатории «Вторичная переработка полимерных материалов и экология» Института Полимерных Материалов НАНА (г. Сумгайит) были проведены анализы по установлению химического и минералогического составов исследуемого наполнителя.

**Таблица 3.** Химический состав известняка, %  
**Table 3.** Chemical composition of lime

Химический состав	Состав композиции %											
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>
Известняк Дашибалахлинского месторождения	0,005	0,324	0,003	43,98	0,005	0,006	0,01	55,64	0,006	0,005	0,008	0,008

**Таблица 4.** Минералогический состав известняка, %

**Table 4.** Mineralogical composition of lime

Название минерала	Минералогический состав	CaCO <sub>3</sub> (кальцит)	Другие примеси		
				Известняк Дашибалахлинского месторождения	Известняк Дашибалахлинского месторождения
		99,5	0,5		

Как видно из данных таблиц 3,4, в данном минерале содержание SiO<sub>2</sub> и CaO, в сравнении с другими компонентами, наибольшее (43,98 и 55,64 соответственно). Это дает основание для рекомендации его в качестве наполнителя при получении полимерного композиционного материала [6-10].

Известно, что накопление полимерных отходов является серьёзным фактором загрязнения окружающей среды. Использование подобных отходов способствует решению проблемы охраны окружающей среды и созданию безотходных технологий.

**Таблица 5.** Физико-механические свойства полученной композиции

**Table 5.** Physical-mechanical properties of the obtained composition

№	Состав композиции %	Толщина пленки, мм	Прочность на разрыв	Относительное удлинение	
			МПа	мм	%
1	1	2	3	4	5
1	ПЭ-100 (марка 15803-020)	1,0	11,5	148	600
2	ПЭ-70% Напол. -30%	1,0 1,0 1,0 1,0	10,87 9,07 8,87 8,07	7 5 5 5	28 20 20 20
	Среднее значение	1,0	9,22	5,5	22
3	ПЭ-60% Напол. -40%	1,1 1,0 1,0 1,1	10,10 10,94 11,05 11,13	5 13 15 13	20 52 60 52
	Среднее значение	1,1	10,81	11	46
4	ПЭ-40% Напол. -60%	1,0 1,0 1,0 1,0	14,48 14,91 14,64 14,76	5 5 5 5	20 20 20 20
	Среднее значение	1,0	14,37	5	20
5	ПЭ-30% Напол. -70%	1,1 1,1 1,1 1,1	12,82 12,65 12,98 12,70	5 5 5 5	20 20 20 20
	Среднее значение	1,1	12,79	5	20

В этой связи нами, путем смешения компонентов на лабораторных вальцах при температуре валиков 120/140°C±5°C, времени вальцевания 10-15мин. получена композиция при различных соотношениях известняка и отработанного полимера. Содержание порошкообразного минерального наполнителя в матрице изменялось до 70 масс. % (таблица 5).

Из представленных в таблице 5 данных видно, что максимальная величина прочности на разрыв достигается при введении в состав полимерной композиции известняка в количестве 60 масс.%, что объясняется созданием при данном соотношении компонентов более однородной структуры композиции. Наполнение полимера более высоким количеством наполнителя способствует повышению хрупкости композиции и уменьшению его прочности.

Практическое претворение в жизнь полученных научных результатов, несомненно, способствует оздоровлению окружающей среды Западного региона республики и даст определённый экономический эффект.

## Заключение

Обобщая результаты данного исследования и исследований, проведённых нами ранее, можно сделать вывод о том, что содержание наполнителя влияет на деформационно-прочностные показатели наполненных композиционных материалов. Данное обстоятельство способствует расширению области применения последних. Наполнение отработанного бытового полимерного отхода дисперсным наполнителем-известняком, даст возможность применять полученный материал для технических целей, а также в аграрной промышленности.

## REFERENCES

1. Napolniteli dlya polimernyh kompozicionnyh materialov: Spravochnoe posobie. Per. s .angl. (Pod.red P.G. Babaevskogo. - M: Himiya, 1981, 736 s. . (in Russia)
2. Jafarov V.D. Okruzhayushchaya sreda: vtorichnoe ispol'zovanie polimernyh othodov. Baku: 2014, 204 s. (in Russia)
3. Vorob'yov A.F., Drakin S.I. Praktikum po neorganicheskoy himii-2 izd.M: TID, 2013, 249s.. (in Russia)
4. Tret'yakov Yu.D. Praktikum po neorganich. himii. M: Akademiya, 2004, 384s.. (in Russia)
5. GOST 5382-23; 8735-65;264211-86.
6. Sharifova M.T., Dzhafarov V.D., Gadzhieva E.M. i dr. Issledovanie svojstv gliny Misklininskogo i Dastafurskogo mestorozhdenij Zap.regiona Azerbajdzhana. - Baku: «Elm» NANA, Gyandzhinskoe Otdelenie. «Sbornik izvestij», Gyandzha: 2020, №1 (79), 32-37.s. (in Russia)
7. Jafarov V.D. Napolnennye kompozicionnye materialy na osnove otrabotannogo polietilena nizkoj plotnosti // Az.him. zhurn.2005,№1,124 -126.s. (in Russia)
8. Jafarov V.D.,Babaeva G.R., Veliev I.V. Sozdanie vysokonapolnennyh kompozicij na osnove polietilena nizkoj plotnosti, kaolina i polimernogo appretu // Vestnik Azerbajdzhanskoy Inzhenernoj Akademii, Baku 2013, tom 5, №2, 83-87.s. (in Russia)
9. Aliev F.Yu., Dzhafarov V.D., Babaeva G.R., Sharifova M.Sh. i dr. Vliyanie neorganicheskikh soedinenij na kompoziciji s polietilenovoj matricej. –MOAz. Resp. Gyandzhinskij Gos.univ.// Materialy mezdunar.konferencii, II ch.i. Gyandzha: 2016, s.36. (in Russia)
10. Alxanov P.Ş. Bektaşı N.R. , Musayeva G.H., Mənəfov M.Ə., Rəcəbova M.C., Xəlilova S.M., Cəfərov V.C. Polietilen əsası kompozisiyaların xassələrinə poliakrilatın appret kimi təsiri // Azərbaycan Mühəndis Akademiyasının Xəbərləri, Baki 2021, cild 13, №1,s 68-79 (in Azerbaijan)

Поступило в редакцию: 24.01.2021  
После доработки: 12.06.2021  
Принято к публикации: 19.06.2021

# Investigation of the Surface Tension Coefficient of the Depressant Additive and Components of Oil

**G.R. Gurbanov, M.B. Adygezalova, S.M. Pashayeva**

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

**For correspondence:**

*Adygezalova Mehpara / e-mail: mehpareadigozelova@yahoo.com*

**Abstract**

For the first time in laboratory conditions, the coefficient of surface tension of the depressant additive "Difron-4201" and polar-molecular asphaltene-resinous components of highly paraffinic model oil were determined. During the experiment, a solution of depressant additive and asphaltene-resinous components in toluene was used. The concentration of the solution was increased to a constant value of the surface tension coefficient was established, and water was used as the standard liquid. The ring detachment method (du Noüy) was used to determine the tension coefficient of the surface of the depressant additive and asphaltene-resinous heterocomponents, and the measurement process was carried out on a tensiometer with a relative error of  $\pm 1\%$ . The results of the experiments showed that the surface tension coefficient increases with an increase in the concentration of the additive, asphaltene-resinous components in the solution. Analysis of the values obtained during the measurements showed that the surface tension coefficient of the asphaltene components of the highly paraffinic model oil is higher than the surface tension coefficient of the depressant additive Difron-4201, and the surface tension coefficient of the resin components is close to the value obtained in the additive. This result gives reason to believe that it is the resin components that affect the effectiveness of the depressant additive.

**Keywords:** surface tension coefficient, highly paraffinic model oil, depressant additive "Difron-4201", asphaltene-resinous components, surface-active substance (SAS), viscosity, temperature.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_89\_94

**For citation:**

*Gurbanov G.R., Adygezalova M.B., Pashayeva S.M.*

[Investigation of the Surface Tension Coefficient of the Depressant Additive and Components of Oil]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 89 – 94 (in English)*

## Depressor aşqarın və neft komponentlərinin səthi gərilmə əmsalının tədqiqi

**H.R. Qurbanov, M.B. Adıgozəlova, S.M. Paşayeva**

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

### Yazışma üçün:

Adıgozəlova Mehparə / e-mail: mehpareadigozelova@yahoo.com

### **Annotasiya**

İlk dəfə olaraq laboratoriya şəraitində “Difron-4201” depressor aşqarının və yüksəkparafinli model neftin polyar molekullu asfalten-qətran komponentlərinin səthi gərilmə əmsali təyin edilmişdir. Təcrübədən alınan nəticələrdən məlum olmuşdur ki aşqarın, asfalten və qətranın məhlulda qatılışı artdıqca səthi gərilmə əmsali da artır. Ölçmələr zamanı alınmış qiymətlərin analizi yüksək parafinli model neftinin asfalten komponentlərinin səthi gərilmə əmsalının qiymətinin “Difron-4201” depressor aşqarının səthi gərilmə əmsalının qiymətindən yüksək, qətran komponentlərinin səthi gərilmə əmsalının qiymətinin isə aşqarda alınan qiymətə yaxın olduğunu göstərmüşdür. Belə bir nəticə “Difron-4201” depressor aşqarının effektliyinə məhz qətran komponentlərinin təsir etdiyini deməyə əsas vermiş olur.

**Açar sözlər:** səthi gərilmə əmsali, yüksək parafinli model neft, “Difron-4201” depressor aşqarı, asfalten-qətran komponentləri, səthi aktiv maddə.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_89\_94

---

**УДК622.72**

## Исследование коэффициента поверхностного напряжения депрессорной присадки и компонентов нефти

**Г.Р. Гурбанов, М.Б. Адыгезалова, С.М. Пашаева**

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

### Для переписки:

Адыгезалова Мехпара / e-mail: mehpareadigozelova@yahoo.com

### **Аннотация**

Впервые в лабораторных условиях определен коэффициент поверхностного натяжения депрессорной присадки «Дифрон-4201» и полярно-молекулярных асфальтеносмолистых компонентов высокопарафиновой модельной нефти. Результаты экспериментов показали, что коэффициент поверхностного натяжения увеличивается с увеличением концентрации добавки, асфальтеносмолистого компонента в растворе. Анализ значений, полученных в ходе измерений, показал, что коэффициент поверхностного натяжения асфальтновых компонентов высокопарафинового модельного нефти выше, чем коэффициент поверхностного натяжения депрессорной присадки «Дифрон-4201», а коэффициент поверхностного натяжения компонентов смолы близок к значению, коэффициент поверхностного натяжения депрессорной присадки «Дифрон-4201». Этот результат дает основание полагать, что именно смоляные компоненты влияют на эффективность депрессорной добавки.

**Ключевые слова:** коэффициент поверхностного натяжения, высокопарафиновое модельное нефть, депрессорная присадка «Дифрон-4201», асфальтеносмолистые компоненты, поверхностно-активное вещество (ПАВ), вязкость, температура.

## Introduction

Undoubtedly, in the next new decade, the oil and gas sector will continue to be a priority component of the global energy base.

The main tasks in the development of this sector in modern times are the development of energy-saving technologies and increasing the efficiency of existing main oil pipelines.

One of the ways to solve this problem is the use of chemicals that improve the rheological properties of oils and petroleum products, provide complete cleaning of the pipe cavities, and significantly reduce the energy consumption for transmission.

With the development of the chemical industry, the range of reagents expands, and, accordingly, the scope of their application grows. In this case, narrower specialized reagents are created to solve specific problems in the transportation of oil through pipelines. Thus, the use of chemical reagents is becoming one of the most promising ways to improve pipeline transport and the operation of oil pipelines.

It is known that oils with high paraffin content include oils with a paraffin content of more than 6% by weight of oil. Oils with a high paraffin content exhibit special non-Newtonian properties, expressed in the presence of maximum static shear stress and the dependence of the viscosity on the velocity gradient at transfer temperatures in a conventional pipeline.

At low temperatures, such oils can lose mobility, making it difficult to transport them through pipelines. When transporting highly paraffinic oil through pipelines, various methods are used to increase their fluidity, in particular, the addition of depressants.

Pipeline transportation of high-paraffinic oils with the addition of depressants are considered one of the most promising methods of transporting high-paraffin oil.

The use of depressant additives makes it possible to significantly reduce hydraulic losses during transportation of high-paraffin

oils, reduce the amount of asphalt-resin-paraffin deposits on the walls of pipelines and equipment, as well as facilitate the operation of oil field and oil pipeline equipment [1-6].

Surface phenomena play an important role in the fight against asphalt-resin-paraffin deposits in the oilfield equipment, as well as in the processes of oil production, treatment, transportation and refining.

Although additives are widely used to prevent the formation of wax deposits, there is still no unified theory to explain their mechanism of action. Therefore, the selection of depressants for dispersed oil systems is carried out only empirically.

It is known that all additives have the properties of surfactants (surfactants). Therefore, in addition to the mechanism of their volumetric action, there is information in the literature on the surface mechanism. The effectiveness of the effect of depressants is inversely proportional to their surface tension coefficient of [7-9].

The effectiveness of most additives is also affected by polar molecular asphaltenes and resin components of dispersed petroleum systems. This is most likely due to their surface-active properties. For this reason, the study of the surface tension coefficient of the used depressants and asphaltene-resinous components of highly paraffinic oils is of scientific and practical importance.

## The purpose of the work

Determination of the coefficient of the surface tension of the depressant additive "Difron-4201" and polar molecular asphaltene-resinous components of high-paraffinic model oil in laboratory conditions.

## Experience methodology

During the experiment, were used asphaltene-resinous components of the model oil sample with physicochemical characteristics given in table1.

**Table 1.** Physicochemical characteristics of model oil [10].

Nº	Parameters	Quantity	Assignment Method
1	The amount of water in the sample, %	0.2	GOST 2477-65
2	Density, $\rho_4^{20}$ kg/m <sup>3</sup>	894.3	GOST 3900-85
3	Amount of paraffin, %	11.6	GOST 11851-85
4	Amount of resin, %	10.2	GOST 11851-85
5	Amount of asphaltene, %	5.2	GOST 11851-85
6	Freezing temperature, °C	16	GOST 20287-91
7	Paraffin saturation temperature of oil, °C	28	-
8	Melting point of paraffin, °C	57	GOST 11858-83
9	Amount of sulfur, %	0.22	GOST 1437-75
10	A/R	0.509	-

Difron-4201 produced by OJSC "EKOS-1" of the Russian Federation (table 2) was chosen as a depressant additive.

**Table 2.** Physicochemical characteristics of the depressant additive "Difron 4201" [10].

Nº	Indicators	Note
1	Appearance	Liquid from yellow to brown color
2	Density, 20 °C	Not more than 790 kg/m <sup>3</sup>
3	Ignition temperature in a closed bowl	Not below (-28°C)
4	Water solubility	Does not dissolves
5	Solubility in aromatic solvents	dissolves

The surface tension coefficient of the toluene solution of the test sample was experimentally measured using a tensometric device according to the ring detachment method (du Noüy); the relative error was ± 1%. The concentration of the solutions was

gradually increased by the value of the surface tension coefficient of the samples reached a constant deal, and the final result was based on the surface tension of the solutions. During the experiment, water was used as the reference liquid. The measurement process was carried out at a temperature of 20 °C, and the surface tension of the water was 72.75 mN / m.

The principle of operation of the tensiometer is to measure the force of separation of a wire ring made of a platinum-iridium alloy from the surface of the liquid under study. The calculation of the surface tension value in milliliters (mN / m) per meter is carried out using the following formula:

$$\sigma = \sigma_0 - n/n_0$$

where: n and  $n_0$  - limbs, calculated in a scale proportional to the breaking force for the studied reference liquids;  $\sigma_0$  - surface tension of the reference fluid[11-14].

### Experimental part

The values of the surface tension coefficient of the depressant additive and asphaltene-resinous components of model oil of different concentrations in toluene studied in the laboratory conditions by the ring detachment method were determined, the results of the experiments provided in Table 3.

**Table 3.** Coefficient of surface tension of asphaltene components of the depressant additive "Difron-4201" and model oil, (MH / m)

Sample	Concentration, % (mass)				
	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
"Difron-4201"	34.8	39.2	40.1	40.12	40.12
Asphaltene	51.6	53.2	54.4	54.41	54.41
Resin	35.2	38.0	41.6	41.6	41.6

As can be seen from table 3, the value of the surface tension coefficient increases with an increase in the concentration of the additive, asphaltenes, and resin in the solution.

It is known that the value of the surface tension coefficient is small in non-polar liquids

with weak intermolecular interactions and is broad in polar liquids [18].

Thus, the analysis of the experimental results shows that the value of the surface tension coefficient of the investigated depressant additive "Difron-4201" is less than the amount of the surface tension coefficient of the asphaltene and resin components of the model oil.

As a rule, under crystallization conditions, a complex structural unit (CSU) consisting of n-alkane nuclei is formed from a solution of a dispersed petroleum system. Such CSU has additional surface energy and therefore forms around itself a solvation coating of neutral components of the oil fraction and liquid n-alkanes [8]. As a result, an associative complex of paraffinic hydrocarbons with polar asphaltene-resinous components of a dispersed oil system with uncompensated surface energy is formed

The depressant additive is likely to weaken the molecular interactions between the CSU solvation coating components and the asphaltene-resinous components, resulting in a decrease in the aggregate stability of associations such as asphaltene-resin, but an increase in the tendency towards the association. They likely combine with each other, and the molecular interactions between the solvate coating and the asphaltene-resinous components are significantly weakened, which, in turn, leads to the transition of asphaltene-resinous associations into the composition of the precipitation. An associative complex characterized by low surface energy is formed between the CSU solvation coating and the polar group of the depressant additive polymer as a result of molecular interactions throughout the oil system. Thus, the system becomes thermodynamically equilibrium with a minimum of free energy.

Based on the foregoing, it was concluded that the value of the surface tension coefficient of the used depressant additive "Difron-4201" should be less than the value of the surface tension coefficient of polar asphaltene-resinous

components of the dispersed oil system. This situation allows the depressants additives to form more thermodynamically stable associations with the CSU of the distributed oil system.

Considering that asphaltenes are the most polar components in the dispersed oil system, the value of their surface tension the coefficient will be greater than the value of the surface tension coefficient of all known additives. It follows that asphaltenes do not affect the effectiveness of the additives.

However, the value of the surface tension coefficient of the solution of the resin, components are closer to the amount of the surface tension coefficient of the additive solution. Consequently, the resin components of the petroleum system will affect the effectiveness of more additives.

Thus, laboratory experiments show that the value of the surface tension coefficient of asphaltene components of highly paraffinic model oil is significantly higher than the value of the surface tension coefficient of the Difron-4201 depressant additive and these components do not affect the effectiveness of the additive. However, the influence of the resin components on the efficacy of the additive is great and this effect increases as the value of the coefficient of its surface tension decreases.

## Conclusions

Under laboratory conditions, the value of the surface tension coefficient of the "Difron-4201" depressant and asphaltene-resinous components of highly paraffinic model oil in a solution with toluene at the temperature of 20°C was determined by the ring detachment method using a tensometric device, with a relative error of ± 1% and using water as reference fluid.

The results of laboratory experiments showed that the value of the surface tension coefficient of the asphaltene components of the highly paraffinic model oil is significantly higher than the value of the surface tension

coefficient of the "Difron-4201" depressant additive and these components do not affect the effectiveness of the additive. However, the influence of the resin components on the

efficiency of the additive is great, and this effect is enhanced as the value of the coefficient of its surface tension decreases.

## REFERENCES

1. Barskaya E.E., Ganeeva Y. M., Yusupova T.N., Dayanova D.I. Prediction of problems in oil production based on the analysis of their chemical composition and physical and chemical properties // *Bulletin of Kazan Technological University*. - 2012.-V.15. -№ 6. -P. 166-169. (in Russian)
2. Galimova G. A., Yusupova T. N., Ibragimova D. A., Yakupov I. R. Composition, properties, structure and fractions of asphaltenes of oil dispersed systems // *Bulletin of the Technological University*. - 2015.- V.18. - No. 20.- P.60-65. (in Russian)
3. Litvinets I.V., Nebogina N.A., Prozorova I.V. Influence of additives on structural and mechanical properties of model oil systems // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*. Chemical technology and biotechnology. -2018. -No.3. -p. 42-55. (in Russian)
4. Zhuravlev A.V., Pavlenina V.I., EPukhova E.Y. Investigation of the influence of depressants on the low-temperature properties of oil and on the formation of asphalt-resin-paraffin deposits // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*. Chemical technology and biotechnology. -2019. -No. 2. P.104-112. (in Russian)
5. Ismayilov G.G., Adygezalova M.B. Impact of asphaltene concentration on macroscopic parameters of oil mixtures // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2020, V.12. № 3, p.77-81. (in English)
6. Adygezalova M.B. On the effect of oil mixing on their group structure // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2019, V.11, №2, p.57-62. (in Azerbaijan)
7. Chen W., Zhao Z., Yin C. The interaction of waxes with point depressant // *Fuel*. -2010. -V.89. -P.1127-1132. (in English)
8. Xu J. Effect of polar / nonpolar groups in comb-tupe copolymers on cold flowability and paraffin crystallization of waxy oils // *Fuel*. -2013.-V.103. -P. 600-605. (in English)
9. Lyubimenko V.A. Computer modeling of the structure and properties of intermolecular complexes in diesel fuels in the presence of depressant-dispersing additives // *Proceedings of the pussian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin*. -2014. -No. 2. -P.44-51. (in English)
10. Gurbanov G.R., Adygezalova M.B., Pashaeva S.M. Influence of depressants on the formation of asphalt-resin-paraffin deposits in highly paraffinic oil // *Transport and storage of oil products and hydrocarbon raw materials*. -2020. -№1. -P.23-28. (in Russian)
11. Ismailov O.Y. Determination of the surface tension coefficient of liquid hydrocarbons // *II International Scientific and Practical Conference Bulatov readings*. -2018. -P. 114-116. (in Russian)
12. Gashumova L.A., Nenakhova L.A., Zavodovsky A.G. Determination of the surface tension coefficient at the oil - ASP solution by the rotating drop method // *Izvestiya vysshikh educational institutions. Oil and gas*. - 2014. № 5. P.10-15. (in Russian)
13. Frolov V.I., Mi tyuk D.Y., Tverdiy R.E. Methods for determining surface tension / Methodological instructions for a laboratory workshop on the course "Surface phenomena and dispersed systems". Moscow. 2013. - 46 p. (in Russian)
14. Grigoriev B.V., Vazhenin D.A., Kuzina O.A. Influence of the concentration of water solutions and temperature on the surface tension coefficient // *Bulletin of the Tyumen State University*. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy. -2016.-V.2.-No. 3.-P. 35-48. (in Russian)
15. Frantseva N.N. Colloidal chemistry / Stavropol: Publishing house Paragraph. -2013.-56 p. (in Russian)

Received: 12.02.2021  
Revised: 14.06.2021  
Accepted : 18.06.2021

## **Vector Control Features by Electric Drive of Vessel Deck Mechanisms**

**E.F. Sultanov, E.M. Mammadov**

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

**For correspondence:**

Sultanov Elshan / e-mail: elshen\_sultanov@mail.ru

### **Abstract**

The issue of control with asynchronous electric motor by vector method, passed a long way of development and widely applied in modern electric drives of alternating current is being discussed in article. This method provides the simplicity and efficiency in control, considered as a complex object of asynchronous motor with short-circuited rotor. Spheres of applying the vector method always expand and the applying of it in automated electric drives, contributes of replacement and displacement of electric drive of constant current. Among the factors, first of all contributing as widely applying of asynchronous electric drives by vector control, beginning from 70s of XX century, is possible to indicate the development of powerful electronics, providing the issue of reliable and economically beneficial converters as well as the development of quickly affected microelectronics capable to decide the complex algorithms of control. In the case of sharp growth of the resistance moment on a shaft of electric engine during the operation of the ship deck mechanism due getting the necessary speed reduction on the working mechanical feature (soft mechanical feature  $M \propto w = \text{const}$ ) is possible by applying vector method of regulation. At this, the necessary providing of limit and smoothness becomes easier of electric drive speed regulation. The features of vector control by asynchronous electric motor applied in ship electric drives were researched and offered the conception by vector control asynchronous electric motor in automatic systems in ships with symbol class of automation AUT 2.

**Key words:** vessel, electric drive, asynchronous motor, vector, control.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_95\_100

**For citation:**

*Sultanov E.F., Mammadov E.M.*

[Vector Control Features by Electric Drive of Vessel Deck Mechanisms]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 95–100 (in Azerbaijani)

## Gəmi göyərtə mexanizmlərinin elektrik intiqallarının vektorlarla idarə olunmasının xüsusiyyətləri

E.F. Sultanov, E.M. Məmmədov

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

### Yazışma üçün:

Sultanov Elşən / e-mail: elshen\_sultanov@mail.ru

### Annotasiya

Məqalədə, uzun inkişaf yolu keçmiş və hal hazırda dəyişən cərəyan elektrik intiqallarında ən çox yayılmış idarə sistemi sayılan, asinxron mühərrikin müasir vektorla idarə etmə sistemi məsələsinə baxılmışdır. Bu üsul mürəkkəb obyekt sayılan rotoru qısa qapanmış asinxron mühərrikinin sadə və effektiv yolla idarə edilməsin imkan yaradır. Üsulun tətbiq sahəsi günü gündən genişlənir və bu üsul avtomatik idarə olunan elektrik intiqalları arasında sabit cərəyan intiqalını əvəz etməklə onu kənarlaşdırır. 1970-ci ildən başlayaraq vektor idarəli asinxron intiqalının belə geniş tətbiq edilməsinə təkan verən amillərdən etibarlı və ucuz çeviricilərin hazırlanmasına imkan yaradan güc elektronikasının inkişafını və eləcədə mürəkkəb idarə alqoritmlərini həll etməyə qadir olan və tez işləyən mikro-elektronikanın inkişafını göstərmək olar. Gəmi göyərtə mexanizmlərinin elektrik intiqallarında iş prosesində mühərrikin valımdakı müqavimət momenti qəflətən artıqdə mühərrikin sürətinin işlədiyi mexaniki xarakteristikada lazımi miqdarda enməsini (yumşaq mexaniki xarakteristikən  $M = w = \text{const}$ ) asinxron mühərrikin vektor ilə idarəetmə üsulunda almaq olar. Bu zaman intiqala lazım olan sürət tənzimimin həddini və səlisliyini təmin etmək asanlaşar. Məqalədə gəmi elektrik intiqallarında tətbiq edilən asinxron mühərriklərin vektorlarla idarə olunmasının xüsusiyyətləri araşdırılmış və vektor idarəli asinxron mühərrikin, avtomatlaşdırma dərəcəsi simvolu AUT2 olan gəmilərin avtomatik idarə sistemlərində tətbiq edilmə konsepsiyası təklif olunur.

**Açar sözlər:** gəmi, elektrik intiqalı, asinxron mühərrik, vektor, idarəetmə

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_95\_100

**УДК:** 62.83.52

## Особенности векторного управления электроприводом судовых палубных механизмов

Э.Ф. Султанов, Э.М. Мамедов

Азербайджанская государственная морская академия (ул. Зарифы Алиевой, 18, Баку, AZ1000, Азербайджан)

### Для переписки:

Султанов Эльшан / e-mail: elshen\_sultanov@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается вопрос управления асинхронным электродвигателем, векторным способом, прошедшим большой путь развития и широко применяемым в современных электроприводах переменного тока. Данный способ обеспечивает простоту и эффективность в управлении, считающегося сложным объектом, асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Сфера применения векторного способа постоянно расширяется, и применение его в автоматизированных электроприводах способствует замене электропривода постоянного тока и его вытеснению. Среди факторов, прежде всего способствующих такому широкому применению асинхронного привода с векторным управлением начиная с 70-х годов XX-го века, можно указать развитие силовой электроники, обеспечивающее выпуск надежных и экономически выгодных преобразователей, а также развитие быстродействующей микроэлектроники, способной решать сложные алгоритмы управления. В случае резкого возрастания момента сопротивления на валу электродвигателя при работе судового палубного механизма, получить необходимое снижение скорости на рабочей механической характеристике (мягкая механическая характеристика  $M = w = \text{const}$ ) возможно при применении векторного метода регулирования. При этом необходимое обеспечение предела и плавности регулирования скорости электропривода, облегчается. Исследованы особенности векторного управления асинхронным электродвигателем, применяемым в судовых электроприводах и предложена концепция применения векторно- управляемых асинхронных двигателей в автоматических системах на судах с символом класса автоматизации AUT2.

**Ключевые слова:** судно, электропривод, асинхронный двигатель, вектор, управление

## Giriş

Vektor idarəli asinxron intiqalının inkişaf prosesinin birinci mərhələsi XX əsrin 20-ci illərinin axırından başlanan və 40-cı illərin axırına kimi davam edən ümumiləşdirilmiş universal elektrik maşınının vektor-matrisa riyazi modelinin işləniləb hazırlanması sayılır.

Bu model ideallaşdırılmış elektrik maşınının elektromaqnit prosesini xətti tənliklər vasitəsilə ifadə etməyə imkan yaradırdı.

Əl vasitəsilə hesabat işi çox tələb olunduğu görə bu modeldən istifadə etmək çətin olmuşdur, lakin elektrik maşınının keçid prosesinin nəzəri tənliyində modeldən geniş istifadə edilmişdir.

1971-ci ildə F.Balachko koordinat sistemi rotorun ilişmə selinə yönəlmış asinxron mühərrikin vektor modelindən istifadə etməyi və onun idarəsinin qurulmasını təklif etdi. Vektor idarəsi adını almış bu üsulan mahiyyəti idarə sistemində asinxron mühərrikin əvvəllər məlum olan vektor modelinin ötürmə funksiyasının əksinə olan funksiyadan istifadə edilməsində idi. Nəticədə idarə sisteminin girişində mühərrikin elektromaqnit momentinin tənliyinə daxil olan dəyişən kəmiyyətlər alınır. Bu səbəbdən, belə idarəetmə prinsipinə bəzən bilavasitə momentlə idarə olunma deyilir [1, 2].

**İşin məqsədi.** Hazırkı işin məqsədi gəmilərdə tətbiq edilən göyərtə mexanizmlərinin asinxron mühərrikli elektrik intiqallarının vektor üsulu ilə idarə edilməsinin digər idarəetmə üsullarına nəzərən üstünlüklerinin hesab-təcrübə yolla əsaslandırılması

**Məsələnin qoyuluşu. Stator və rotorun vektor şəklində tənlikləri.** Asinxron mühərrikin faza gərginliklərinin Kirxhof tənlikləri olacaqdır:

$$U_{1a} = i_{1a}r_1 + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (1)$$

$$U_{1b} = i_{1b}r_1 + \frac{d\psi_b}{dt}$$

$$U_{1c} = i_{1c}r_1 + \frac{d\psi_c}{dt}$$

Əgər sıfır təşkiledicisi olarsa, (1) ifadəsinə aşağıdakı tənlik əlavə olunur:

$$U_{10} = i_{10}r_1 + \frac{d\psi_0}{dt}$$

(1) tənliyini vektor şəklində yazaq, bunun üçün ikinci tənliyi  $(U_{1b}) \cdot A$ -ya üçüncüyü isə  $(U_{1c}) \cdot A^2$  -yə vurub, hər üç tənliyi toplayırıq və sağ, sol tərəflərini  $\frac{2}{3}$  -yə vururuq. Nəticədə alırıq [1]:

$$\frac{2}{3}(U_{1a} + U_{1b} \cdot A + U_{1c} \cdot A^2) = \frac{2}{3}(i_{1a} + i_{1b} \cdot A + i_{1c} \cdot A^2) \cdot r_1 + \frac{2}{3} \frac{d}{dt}(\psi_{1a} + \psi_{1b} \cdot A + \psi_{1c} \cdot A^2)$$

Aşağıdakı əvəzətmələrdən sonra

$$\frac{2}{3}(U_{1a} + U_{1b} \cdot A + U_{1c} \cdot A^2) = u_1,$$

$$\frac{2}{3}(i_{1a} + i_{1b} \cdot A + i_{1c} \cdot A^2) = i_1,$$

$$\frac{2}{3}(\psi_{1a} + \psi_{1b} \cdot A + \psi_{1c} \cdot A^2) = \psi_1$$

Sadə şəkildə alırıq:

$$U_1 = i_1 \cdot r_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad (2)$$

Eyni qaydada rotor gərginliyinin x-y koordinat sistemində vektor şəkilli tənliyini almaq olar:

$$U_2 = i_2 \cdot r_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \quad (3)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, (2) və (3) tənlikləri müxtəlif koordinat sistemləri üçün yazılırlar, yəni (2)  $\alpha - \beta$ , (3) isə x-y koordinat sistemində yazılıb. Bu vəziyyət onların birlikdə həll olunmasına imkan vermir. Rotorun tənliyini tərpənməz koordinat sistemi olan  $\alpha - \beta$  keçirmək üçün onun hər iki tərəfini dönmə operatoru (koordinat sisteminin cari dönmə bucağı) olan  $e^{j\alpha\vartheta}$  vururuq və rotorun ilişmə selinin törəməsinin vektorunu, yəni, koordinat sistemində  $\psi_2^{(x, \dot{\alpha})} = \psi_2^{\alpha, \beta} \cdot e^{-j\alpha\vartheta}$  kimi təsvir etsək, alarıq:

$$e^{j\vartheta} \cdot \underline{U}_2^{(x,y)} = e^{j\vartheta} \cdot i_2^{(x,y)} \cdot r_2 + e^{j\vartheta} \frac{d(e^{-j\vartheta} \cdot \underline{\psi}^{(\alpha,\beta)})}{dt}$$

Müvafiq riyazi əməlliyyatdan sonra koordinat sisteminin indeksini nəzərə almasaq, rotorun vektor şəkilli tənliyini statorun koordinat sistemində alarıq:

$$\underline{U}_2 = i_2 \cdot r_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} - j \frac{d\vartheta}{dt} \cdot \underline{\psi}_2 = i_2 \cdot r_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} - j \cdot \omega \cdot \underline{\psi}_2 \quad (4)$$

Burada  $\omega = \frac{d\vartheta}{dt}$  - rotorun cari bucaq sürətidir.

(2) və (3) tənlikləri tərpənməz koordinat sistemi üçün yazılıb, onları asinxron mühərrikinin ümumi sistemində daxil edib həll etmək olar. Bundan başqa, göstərilən hər iki tənliyi sərbəst bucaq sürəti  $\omega^{m,n}$  ilə firlanan  $m-n$  sərbəst koordinat sistemində yazmaq olar. Bunun üçün bunların üzərində (4) almaq üçün aparılmış əməlliyyatlarla eyni olan əməlliyyati aparmaq lazımdır [1, 2].

Nəticədə alarıq:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1^{(m,n)} &= r_1 \cdot i_1^{(m,n)} + \frac{d\underline{\psi}_1^{(m,n)}}{dt} + j\omega \cdot i_1^{(m,n)} \underline{\psi}_1^{(m,n)} \\ \underline{U}_2^{(m,n)} &= r_1 \cdot i_2^{(m,n)} + \frac{d\underline{\psi}_2^{(m,n)}}{dt} + j[\omega^{(m,n)} - \omega] \underline{\psi}_2^{(m,n)} \end{aligned} \right\}$$

Rotoru qısa qapanmış asinxron mühərrikin də  $i_2=0$  olduğu üçün həmin tənlik aşağıdakı kimi olacaqdır.

$$\underline{U}_1^{(m,n)} = r_1 \cdot i_1^{(m,n)} + \frac{d\underline{\psi}_1^{(m,n)}}{dt} + j\omega \cdot i_1^{(m,n)} \underline{\psi}_1^{(m,n)} \quad (5a)$$

$$0 = r_1 \cdot i_2^{(m,n)} + \frac{d\underline{\psi}_2^{(m,n)}}{dt} + j[\omega^{(m,n)} - \omega] \underline{\psi}_2^{(m,n)} \quad (5b)$$

Alınmış tənlikləri müxtəlif koordinat sisteminə keçirmək olar, bunun üçün (5) tənliyində  $\omega^{m,n}$  yerinə müvafiq firlanma tezliyini qoymaq lazımdır.

$\alpha - \beta$  – tərpənməz koordinat sistemi ( $\omega^{m,n} = 0$ ), statorun  $a$  fazasının oxu ilə üst-üstə düşür.

$x-y$  – rotorla sinxron firlanmış koordinat sistemi ( $\omega^{m,n} = \omega$ ), rotorun  $a$  fazasının oxu ilə üst-üstə düşür.

$d-q$  – rotorun ilişmə seli ilə sinxron firlanmış və eyni istiqamətdə olan koordinat

sistemi ( $\omega^{m,n} = \omega$ ),  $m-n$  – sərbəst sürətlə firlanmış və istiqaməti sərbəst olan koordinat sistemi  $\omega^{m,n}$

Asinxron maşınlarında statorun maqnit selinin bucaq tezliyi  $\Omega_1$ , rotorun maqnit selinin bucaq tezliyi  $\Omega_2$  və rotorun firlanmasının bucaq tezliyi  $\Omega$  - ilə aşağıdakı asılılıq ilə bağlıdır.  $\Omega_1 = \Omega \pm \Omega_2$

Burada müsbət işarəsi firlanma istiqamətləri eyni olduğu hala aiddir. Ancaq statorun və rotorun maqnit sahələrinin bucaq tezlikləri  $\Omega_1$  və  $\Omega_2$  müvafiq olaraq onların cərəyanlarının tezliyi və cüt qütblər sayı ilə təyin edilir.

$$\text{Yəni, } \Omega_1 = \frac{\omega_1}{3_n} \quad \text{və} \quad \Omega_2 = \frac{\omega_2}{3_n}$$

Burada:  $Z_p$ -cüt qütblər sayı

$\omega_1$  və  $\omega_2$  – statorun və rotorun cərəyanlarının tezliyidir.

Bunların əsasında yaza bilərik:

$$\omega_1 = \Omega \cdot 3_n \pm \omega_2 = \omega \pm \omega_2 \quad (6)$$

Burada  $\omega_1 = \Omega \cdot 3_n$  – bir cüt qütbə malik olan asinxron mühərrikinin rotorunun firlanmasının bucaq tezliyidir.

**Asinxron mühərrikinin vektorlarla idarə edilməsinin ümumi prinsipi.** Asinxron mühərriklərdə elektrik enerjisinin mexaniki enerjiyə əvvəl məsələsinin əsas axırıcı göstəricisi valdakı elektromaqnit moment sayılır.

O, statordan və ya rotordan keçən cərəyanın maqnit sahəsi ilə qarşılıqlı əlaqəsindən yaranır və vektor kəmiyyətlərinin vurulmasından alındığı üçün aşağıdakı kimi təsvir oluna bilər.

$$m = \frac{3}{2} Z_p (\underline{\psi}_1 \cdot i_1) = -\frac{3}{2} Z_p (\underline{\psi}_1 \cdot i_2) = \frac{3}{2} Z_p (\underline{\psi}_2 \cdot i_2) \quad (7)$$

Burada,  $Z_p$  – maşının cüt qütblərinin sayıdır.

Məlum olduğu kimi elektrik intiqalının tam idarəsini təmin etmək üçün mühərrikin yaratdığı elektromaqnit momentin idarə olunması mümkün olmalıdır.

Asinxron mühərrikli intiqalın tam idarəsini qurmaq üçün 7-də göstərilmiş moment döşənəndən istifadə etmək olar [2, 3].

Həmin düsturdan göründüyü kimi elektro-maqnit momentinin ifadəsində rotoru qısa qapanmış asinxron mühərrrikində ölçülməsi mümkün olmayan  $i_2$  rotor cərəyanı vardır və bu momentin idarə olunmasını çətinləşdirir. Buna görə də asinxron mühərrrikinin cərəyanları və ilişmə selləri arasındaki əlaqədən [3,4], yəni  $\psi_1 = L_1 i_1 + L_m i_2$  və  $\psi_2 = L_2 i_2 + L_m i_1$  düsturlarına əsasən, elektro-maqnit momentin düsturunda  $i_2$ -ni  $i_1$  ilə əvəz edək:

$$\begin{aligned} m &= \frac{3}{2} Z_p L_m (i_2 \cdot i_1) = -\frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_1} (\psi_1 \cdot i_2) = \\ &= \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_1} (\psi_2 \cdot i_1) \end{aligned} \quad (8)$$

Ümumiyyətlə, tənliklərin seçilməsi idarə sisteminin qurulmasında böyük rol oynayır, çünki tənliklərə daxil olan kəmiyyətlərin bir çoxlarının ölçülməsi (xüsusən qısa qapanmış rotorlu asinxron mühərrrikdə) qeyri mümkündür. Bundan əlavə, tənliyin düzgün seçilməməsi sistemin ötürmə funksiyasını mürəkkəbləşdirir və onun dərəcəsini artırı bilər.

Seçilmədən asılı olmayaraq elektro-maqnit momentin idarəsinin strukturu (tərkibi) 9-da göstərilənlə eyni olduqda asinxron mühərrrikin modelinin və idarə sisteminin qurulmasının ümumi prinsipi, elektro-maqnit momentin müəyyən kəmiyyətinin vektoruna yönəlmış koordinat sistemindən istifadə edilməsindədir.

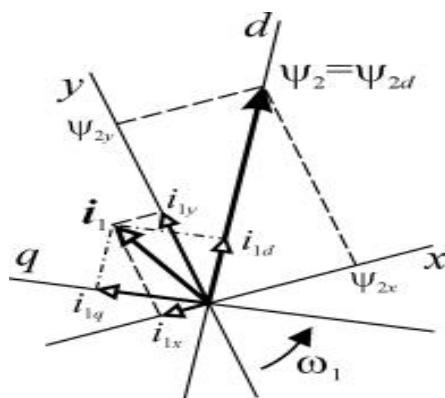
$$\begin{aligned} m &= -\frac{3}{2} Z_p (\psi_{2x} + j\psi_{2y}) \cdot (i_{2x} + ji_{2y}) = \\ &= -\frac{3}{2} Z_p (\psi_{2x} \cdot i_{2y} - \psi_{2y} \cdot i_{2x}) = \\ &= \frac{3}{2} Z_p (\psi_{2y} \cdot i_{2x} - \psi_{2x} \cdot i_{2y}) \end{aligned} \quad (9)$$

Bələ olduqda seçilmiş kəmiyyətin vektorunun koordinat sisteminin digər oxuna (məsələn, d, q koordinat sistemində q oxuna) proyeksiyası və onun moment düsturunda təşkiledicisi sıfır bərabər olacaqdır.

Bununla da asinxron mühərrrikin elektro-maqnit momentinin ifadəsi sabit cərəyan mühərrrikinin elektro-maqnit momentinin ifa-

dəsi ilə eyni olur, hansı ki, mühərrrikin lövbər cərəyanına və əsas maqnit selinə ( $M = kI_L \Phi$ ) mütənasibdir.

Elektro-maqnit momentinə daxil olan kəmiyyətlərdən hansının vektorunun koordinat sistemi üçün yön (koordinat sisteminin oxlarından birinin həmin vektorla üst-üstə düşməsi) seçilməsi sərbəstdirsə, burada ancaq sistemin sadəliyi və asinxron mühərrrikin modelinin işləyə bilməsi (realizasiya olunması) nəzərə alınmalıdır [3, 4].



Şəkil - Elektro-maqnit momentin müxtəlif koordinat sistemlərində təyin edən vektorlar

Figure - Vectors determining the electromagnetic moment in different coordinate systems

Məsələn, koordinat sistemi (d, q) rotorun ilişmə selinin ( $\psi_2$ ) vektoruna yönəlmış olsa (üst-üstə düşsə), alarıq: ( $\psi_2 = \psi_{2d}; \psi_{2q} = 0$ ) elektro-maqnit momentinin ifadəsi isə aşağıdakı şəkildə olacaqdır:

$$m = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{2q} \cdot i_{2d} - \psi_{2d} \cdot i_{2q}) = -\frac{3}{2} Z_p \psi_{2d} i_{2q} \quad (10)$$

və yaxud

$$m = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} \cdot i_{1q} - \psi_{2q} \cdot i_{1d}) = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_2} \psi_{2d} i_{1q}$$

(10)-da göstərilənlərdən aydın olur ki, bunlardan birinin düsturu rotoru qısa qapanmış asinxron mühərrrikinin idarə olunması üçün tətbiq edilə bilməz, çünki bu düsturda ölçülməsi və idarə olunması mümkün olmayan rotor cərəyanı ( $i_{2q}$ ) vardır.

Eyni zamanda, ikinci düstur rotorun ilışmə selini sabit saxlamaq şərti ilə stator cərəyanının eninə oxa proyeksiyası ( $i_{1q}$ ) dəyişməklə, elektromaqnit momentini idarə etməyə imkan verir.

Beləliklə asinxron mühərrinin vektorla idarə sistemini qurmaq üçün koordinat sistemi-nə yönəlmüş olan vektoru seçmək, elektromaqnit momentin tənliyini müəyyən etmək və bu tənliyə daxil olan kəmiyyətləri (5b) görə seçmək lazımdır [3, 4].

### Nəticə

Məqalədə gəmi elektrik intiqallarında tətbiq edilən rotoru qısa qapanmış üç fazlı asinxron mühərrinin idarə edilməsində yeni texniki nailiyyət sayılan vektorla idarə üsulu araşdırılmış və aydın olmuşdur ki, bu üsul gəmi elektrik intiqallarında tətbiq edilən

asinxron mühərrinin bir çox müsbət cəhətləri verir. Belə ki, mühərrinin sürət tənziminin həddini və səlisliyini təmin etmək asanlaşır. Mexaniki xarakteristikani (yumşaq mexaniki xarakteristikaniñ M- $\omega$ const) asinxron mühərrinin vektor ilə idarə etmə üsulunda almaq olar.  $d-q$  koordinat sistemində aparılmış riyazi əməliyyatların nəticəsində mühərrinin elektromaqnit momentinin ifadəsi sadələşdirilmiş, ölçülüməsi və hesablanması asan başa gələn, cəmi iki parametrdən asılı olan (rotorun ilışmə selindən və onun cərəyanının tezliyindən) riyazi ifadəsi alınmışdır.

Məqalədə aparılmış təhlillərə və hesablamala rəsasən, AUT2 avtomatlaşma dərəcəli gəmilərdə asinxron mühərriki vektor idarəli avtomatik idarə sistemlərinin tətbiq edilməsi təklif olunur.

### REFERENCES

1. Rudakov V.V., Stolyarov I.M., Dartau V.A. «Asinhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem» L.Energoatomizdat, 1987-134 s. (in Russia)
2. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka /GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina»-Ivanovo, 2008-298 s. (in Russia)
3. Pankratov V.V., Zima E.A. Metod mnogokriterial'noj optimizacii algoritmov vektornogo upravleniya asinhronnymi elektroprivodami// Izv. vuzov. Elektromekhanika - 2002-№ 2, 44-49 (in Russia)
4. Sokolovskij G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. - M.: Izdatel'skij centr "Akademiya", 2006-272 s. (in Russia)
5. Sultanov E.F., Mamedov E.M. Upravlenie elektroprivodami sudovykh gruzopod'emnykh mekhanizmov s pomoshch'yu tiristornykh regulyatorov napryazheniya. //Vestnik Azerbaidzhanskoi inzhenernoi akademii. 2019. Vol.11, №3. S. 90-93 (in Russian)

Redaksiyaya daxil olub: 07.09.2020  
Tamamlama işlərindən sonra: 14.06.2021  
Nəşrə qəbul edilib: 19.06.2021

## Assessments of the Influence of Rain on Tropospheric Delay of GPS Signals

R.A. Eminov

Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)

**For correspondence:**

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

**Abstract**

For carrying out GPS measurements with millimeter accuracy, the most important issues of ensuring such measurements are the issues of correct assessment of the effect of water vapor and hydrometeors. It is considered that the "dry" delay of GPS signals usually falls into the category of "systematic" error, which can be eliminated by calculation. Methods and means for measuring water vapor have been currently developed and worked out much more widely than methods for measuring hydrometeors. Taking into account the above, it becomes clear that an accurate assessment of the impact of hydrometeors, and especially rain on the signals of GPS satellites is an urgent task. It is noted that the relevance of the development of technical means for measuring the intensity of rainfall is also explained by the property of rains to greatly attenuate electromagnetic waves with a frequency of 10 GHz and higher. Based on the analysis of the factual material, it is shown that the delay of GPS satellite signals due to the influence of hydrometeors will be 5-8% of the "wet" delay. The process of distrometric measurements of the occurrence frequency of raindrops of various sizes has been optimized. The functional of unconstrained variational optimization has been formulated and its mathematical algorithm has been given.

**Keywords:** GPS signals, rain, hydrometeors, wet delay, dystrometric measurements, optimization, estimation.

DOI: 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_101\_105

**For citation:**

Eminov R.A.

[Assessments of the Influence of Rain on Tropospheric Delay of GPS Signals]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*

2021, vol. 13, no. 2, Pp. 101–105. (in Azerbaijan)

## Yağışın GPS siqnallarının troposfer gecikməsinə etdiyi təsirinin qiymətləndirilməsi

R.Ə. Eminov

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

### Yazışma üçün:

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

### **Annotasiya**

GPS ölçmələrini millimetr dəqiqliyilə aparmaq üçün önəmli məsələlərdən biri də troposferdəki su buxarlarının və hidrometeorların onlara edilən təsirinin düzgün qiymətləndirilməsidir. Hesab edirlər ki, GPS siqnallarının “quru” gecikməsi adətən “müntəzəm” səhvlər kateqoriyasına aiddir və buna görə də onu hesablamaq yolu ilə təsirini azaltmaq olar. Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, demək olar ki, GPS siqnallarına hidrometeorların və əsasən də yağışların etdikləri təsirlərinin dəqiq qiymətləndirilməsi aktual məsələdir. Qeyd olunur ki, yağış 10 HHs və ondan yuxarı tezlikli elektromaqnit dalğalarını çox zəyiflətmək xassəsinə malik olduğundan, onun intensivliyinin ölçülməsi üçün yeni texniki vasitələrinin yaradılmasını da aktual hesab etmək olar. Faktiki materialların təhlili nəticəsində göstərilmişdir ki, hidrometeorların təsiri nəticəsində GPS siqnalların gecikməsi cəm “rütubət” gecikməsinin 5-8 % təşkil edir. Müxtəlif ölçülü yağış damcılarının yağma tezliyinin distrometrik ölçülməsi prosesi optimallaşdırılmışdır. Şərtsiz variasion optimizasiyasının funksionalı formalaşdırılmışdır və onun riyazi alqoritmi verilmişdir.

**Açar sözlər:** GPS siqnallar, yağış, hidrometeorlar, rütubət gecikməsi, distrometrik ölçmələr, optimallaşdırma, qiymətləndirmə.

DOI: 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_101\_105

УДК: 528.4. 528.856

## Оценка влияния дождя на тропосферную задержку GPS сигналов

Р.А. Эминов

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

### Для переписки:

Эминов Рамиз / e-mail: eminovramiz@mail.ru

### **Аннотация**

Для проведения GPS-измерений с миллиметровой точностью наиболее важными вопросами обеспечения проведения таких измерений являются вопросы правильной оценки влияния водяных паров и гидрометеоров. Считается, что «сухая» задержка сигналов GPS обычно относится к категории «систематической» погрешности, которая устранима расчетным путем. Точная оценка воздействия гидрометеоров, и в особенности дождей, на сигналы GPS спутников является актуальной задачей. Отмечается, что актуальность разработки технических средств измерения интенсивности дождей, скорее всего, также объясняется свойством дождей сильно ослаблять электромагнитные волны с частотой 10 ГГц и выше. На основе анализа фактического материала показано, что задержка сигналов GPS спутников из-за влияния гидрометеоров составляет 5-8 % от «влажной» задержки. Оптимизирован процесс дистрометрических измерений частотности появления дождевых капель различных размеров. Сформулирован функционал безусловной вариационной оптимизации и дан его математический алгоритм.

**Ключевые слова:** GPS сигналы, дождь, гидрометеоры, влажная задержка, дистрометрические измерения, оптимизация, оценка.

## Giriş

Məlumdur ki, Qlobal Mövqetəyinət mə Sisteminin peyklərilə ötürünlən 1,575 HHs və 1,228 HHs tezlikli mikrodalğalı siqnallar aşağıdakı amillərin təsiri nəticəsində troposferdə gecikməyə məruz qalırlar [1]: atmosferin quru hava kütləsi; su buxarları; hidrometeorlar (buludlar, duman, qar, yağış, dolu); giroskopik aerozollar; qum qasırğaları; vulkanik küllər.

GPS ölçmələrini millimetr dəqiqliyilə aparmaq üçün önəmli məsələlərdən biri də su buxarlarının və hidrometeorların onlara edilən təsirinin düzgün qiymətləndirilməsidir. Hesab edirlər ki, GPS siqnallarının “quru” gecikməsi adətən “müntəzəm” səhv-lər kateqoriyasına aiddir və buna görə də onu hesablamaq yolu ilə təsirini azaltmaq olar. Eyni zamanda “hidrometeorlar” adlanan bir qrup amillər tərəfdən törədilən gecikmələr su buxarlarının əmələ gətirən gecikməsinin 5-8 % -ni təşkil edir.

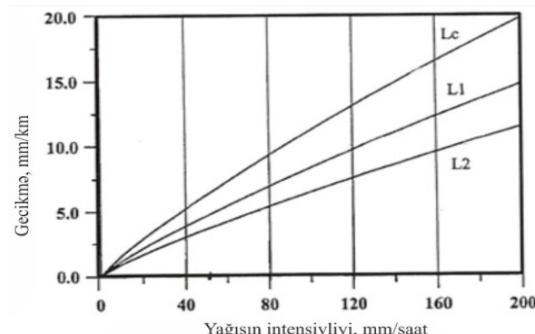
Qeyd etmək lazımdır ki, müasir zamanda hidrometeorları ölçən metodlar, su buxarlarını ölçən metod və vasitələrilə müqayisədə, xeyli az inkişaf etmişdir. Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, demək olar ki, GPS siqnallarına hidrometeorların və əsasən də yağışların etdikləri təsirlərinin dəqiq qiymətləndirilməsi aktual məsələdir.

İş [2]-də yağışın GPS sistemlərinin keyfiyyətinə etdiyi təsirinin kompleks qiymətləndirilməsi aparılmışdır və onun peyk siqnallarına neqativ təsirləri qiymətləndirilmişdir.

Şək. 1-də GPS siqnallarının gecikmə qiymətinin yağış intensivliyindən asılılığının əyriləri göstərilir [3].

Şək. 1-də verilən qrafiklərdən görünür ki, güclü yağışda siqnalların gecikməsi bir

neçə metrə çatır və bu GPS-ölçmələri hətta metr dəqiqliyilə aparmağa imkan vermir. Qeyd etmək lazımdır ki, yağış 10 HHs və ondan yuxarı tezlikli elektromaqnit dalğalarını çox zəiflətmək xassəsinə malik olduğundan, onun intensivliyinin ölçülülməsi üçün yeni texniki vasitələrin yaradılmasını da aktual hesab etmək olar.



Şəkil 1. GPS siqnallarının gecikmə qiymətinin yağış intensivliyindən asılılığının əyriləri göstərilir:  
L1 – 1,575 HHs tezlikli siqnal gecikməsidir; L2 – 1,228 HHs tezlikli siqnal gecikməsidir; Lc – cəm gecikmədir.

**Figure 1.** The probability curves of the delay value of GPS signals from rain intensity are shown:  
L1 – 1,575 HHs is the frequency of signal delay; L2 – 1,228 HHs is the frequency of signal delay; Lc – total delay.

Bu tezlik həddindən aşağıda siqnalların zəiflənməsi xeyli azalır və 1,2 – 1,5 HHs tezliklərində çox cüzi olur. Beləliklə, yağışın intensivliyini ölçməyə imkan verən hər bir texniki vasitə iki təyinatlı olmalıdır:

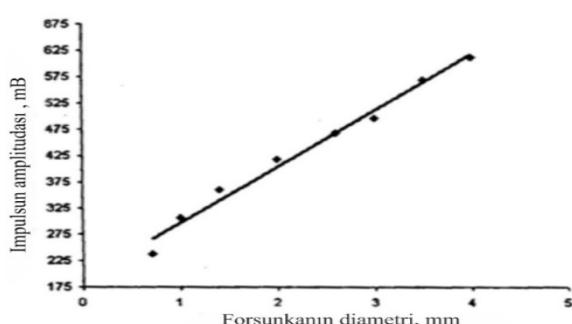
1. 10 HHs və ondan yuxarı tezliklərdə yağış damcıları ilə radiosiqnalların zəiflənməsinin qiymətləndirilməsi üçün;
2. 1,2 – 1,5 HHs tezliklərdə GPS radiosiqnallarının gecikməsinin qymətləndirilməsi üçün.

Bu günə kimi məsafədən zondlaşdırma prinsipi əsasında işləyən və “lazerli distrometr” adlanan lazerli yağışölçənlər buraxılıb tətbiq olunur.

İş [3]-də qeyd olunur ki, distrometrlerin iş prinsipi aşağıdakına əsaslanır. Lazer şüası fotoqəbuledicinin üzərinə yönəlir və bu zaman yağış damcıları onun üzərindən keçərək şüalandırmanın kəsir yaxud da zəiflədir. Bu halda impulsun hündürlüyü və eni damcının ölçüsünə və şuanın damcıdan keçməsi müddətinə uyğun olur.

Bu cür ölçütürərin nizamlanması üçün müxtəlif generatorlardan və su damcılarının formalasdırıcılarından istifadə edirlər. Misal üçün, şək.2-də impuls hündürlüğünün su damcılarını formalasdıran forsunkanın diametrindən asılılığının əyrisi verilib.

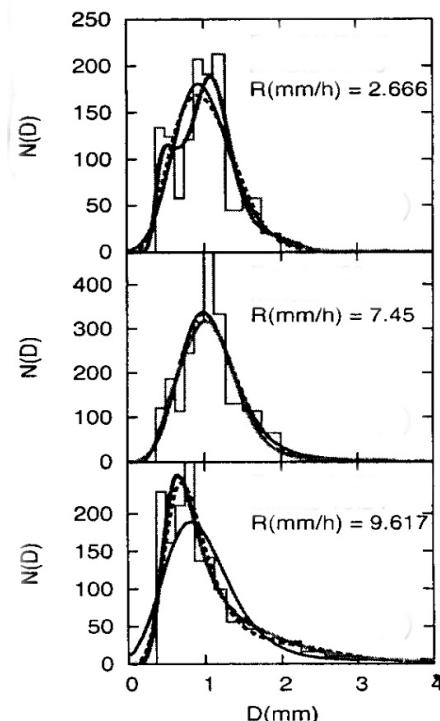
İş [4]-də 785 nm dalğa uzunluğunda işləyən və seriya ilə buraxılan lazerlə distrometr haqqında məlumatlar verilir. Onun vasitəsilə 0,005 m/saat - 250 mm/saat arasındaki intensivlik diapazonunda 0,16 mm – 8 mm diametrli damcıları ölçmək olar.



Şəkil 2. İmpuls amplitudasının forsunka diametrindən asılılığı, mm

**Figure 2.** Dependence of pulse amplitude on injector diameter, mm

İş [5]-də göstərilir ki, yağış damcılarının ölçülərinə görə baş verən tezliklər paylanması qamma paylanmasıın normallaşmış funksiyası ilə daha yaxşı approksimasiya olunur (şək.3).



Şəkil 3. Yağış damcılarının diametrlerinin paylanması qrafikləri. Qəbul olunmuş qeydlər: D – diametri D olan damcıların yağma tezliyidir; R – yağışın intensivliyidir.

**Figure 3.** Graphs of raindrop diametr distribution. Accepted notes: : D- is the precipitation frequency of droplets with diameter D; R – is the intensity of rain.

### Məsələnin həlli

Distrometrik yağış ölçmələrinin optimizasiya məsələsini nəzərdən keçirək.

Bu məqsədlə distrometrik yağış ölçmələrinin əsas informativ parametrlərini müəyyən edək. Həmin parametrlər bunlardır:

1. Yağış damcılarının ölçülərinə görə yağma tezliyinin paylanması diaqramı.
2. Ölçütün çıxışında siqnal/səs nisbəti.

Yuxarıda göstərilən parametrlərin qarşılıqlı əlaqəsi distrometrik yağış ölçmələrinin optimal rejimində nəzərdən keçirilib. İlk növbədə, bu ölçmələrin optimallıq meyarının seçimi məsələsi üzərində dayanaq.

İş [5]-də tətbiq olunan şərti-entropiyalı meyardan fərqli olaraq, bizim halda aşağıda göstərilən integral informasiyanın funksionalın tətbiqi daha məqsədyönlüdür [6]

$$\int_0^{D_{max}} N(D) \cdot \log_2 [\psi(D) + 1] dD \quad (1)$$

burada  $N(D)$ -yağış damcılarının ölçülərinə görə paylanmasıdır;  $\psi(D)$ -ölçücünün çıxışında siqnal/səs nisbətidir.

İş [6]-dan fərqli olaraq, bu məqsədlə aşağıdakı kvadratik qiymətləndirmə ifadəsindən istifadə edərək, iş [1]-dəki meyarın formasını dəyişmək məqsədyönlüdür

$$\int_0^{D_{max}} \{N(D) \cdot \log_2 [\psi(D) + 1]\}^2 dD \quad (2)$$

(2)-ci kvadratik integral meyarından istifadə etsək,  $N(D)$  və  $\psi(D)$  kəmiyyətlərinin cüzi dəyişən hallarında daha həssas qiymətləndirilmə almaqla yanaşı, siqnallarda yaranan müxtəlif təsadüfi additiv səslərə qarşı müqaviməti də artırmaq olar.

Distrometrik yağış ölçmələrinin optimizasiyasını etmək üçün aşağıdakı məhdudlaşdırıcı şərtdən istifadə edək:

$$\int_0^{D_{max}} N(D) dD = C, \quad (3)$$

burada  $C = const$ .

(2)-ci və (3)-cü ifadələr şərtsiz variasiyon optimizasiyasının aşağıdakı funksionalını formalasdırmağa imkan verir:

$$F_0 = \int_0^{D_{max}} F_1[N(D), \psi(D)] dD = \\ = \int_0^{D_{max}} [N^2(D) \cdot \log_2^2 [\psi(D) + 1] + \lambda \cdot N(D)] dD \quad (4)$$

burada  $\lambda$  - Laqranj sabitidir.

Eyler qanununa əsasən,  $F_0$  ekstremumunu  $N(D)$ -yə görə hesablamaq üçün aşağıdakı şərtdən istifadə edək:

$$\frac{dF_1}{dN(D)} = 0. \quad (5)$$

$$(4)-cü və (5)-ci ifadələrə nəzarən 2N(D) \cdot \log_2^2 [\psi(D) + 1] + \lambda = 0, \quad (6)$$

$$N(D) = -\frac{\lambda}{2 \{ \log_2 [\psi(D) + 1] \}}. \quad (7)$$

(3)-cü və (7)-ci ifadələrə nəzarən

$$\lambda = -\frac{C}{\int_0^{D_{max}} \frac{dD}{2 \{ \log_2 [\psi(D) + 1] \}}}. \quad (8)$$

Yekunda (7)-ci və (8)-ci ifadələrdən bunu alarıq

$$N(D) = \frac{C}{\log_2 [\psi(D) + 1] \cdot \int_0^{D_{max}} \frac{dD}{\log_2 [\psi(D) + 1]}} \quad (9)$$

Bu qeydləri etsək,

$$\int_0^{D_{max}} \frac{dD}{\log_2 [\psi(D) + 1]} = C_1, \quad C_1 = const \quad (10)$$

onda, (9)-cu ifadədən bunu alarıq:

$$N(D) \cdot \log_2 [\psi(D) + 1] = \frac{C}{C_1} = C_2. \quad (11)$$

Beləliklə, (10)-cu şərt yerinə yetirilsə,  $N(D)$  və  $\log_2 [\psi(D) + 1]$  qarşılıqlı dəyişsə,  $N(D)$  isə  $\psi(D)$  azalsa–artsa və əksinə olsa, onda (4)-cü funksional ekstremuma çatacaq.

Catlığımız ekstremumunun xarakterini nəzərdən keçirərək, (4)-cü funksionalın ikinci törəməsini  $N(D)$ -yə görə alıb bunu əldə etdik:

$$\frac{d^2 F_0}{dN^2(D)} = \log_2^2 [\psi(D) + 1]. \quad (12)$$

Beləliklə, (12)-ci ifadəyə görə (4)-cü funksionalın ikinci törəməsi müsbət kəmiyyətdir, bu da onu göstərir ki, (11)-ci şərt yerinə yetirilsə, funksional minimuma çatacaq. Beləliklə, (10)-cu funksionalı maksimuma çatdırmaq üçün  $N(D)$  və  $\psi(D)$  funksiyalarının sıfazlı dəyişməsini təmin etmək tələb olunur, yəni,  $\psi(D)$  artan zaman  $N(D)$  böyüməlidir və əksinə.

Beləliklə, yağma tezlikləri maksimal qiymətdə olan damcıların ölçülülməsi zamanı optimal distrometr çıxışda siqnal/səs nisbətinin ən böyük qiymətini təmin etməlidir. Ölçücünün bu cür iş alqoritmi onun optimal çalışmasını da təmin edə bilər.

## Nəticə

Aparılmış tədqiqatlar əsasında aşağıdakı nəticələr alınmışdır:

Faktiki materialların təhlili nəticəsində göstərilmişdir ki, hidrometeorların təsiri nəticəsində GPS siqnalların gecikməsi cəm “rütubət” gecikməsinin 5 – 8 % -ni təşkil edir.

Müxtəlif ölçüldü yağış damcılarının yağma tezliyinin distrometrik ölçülülməsi prosesi optimallaşdırılmışdır.

Şərtsiz variasion optimizasiyasının funksionalı formalasdırılmışdır və onun riyazi alqoritmi verilmişdir.

## REFERENCES

1. Solheim F.S., Vivekanandan J. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // *Journal of Geophysical Research*. – April 27 1999, Vol. 104, No. D8. Pp. 9663-9670.
2. Eminov R.Ə., İbrahimova S.İ. Yağışın GPS mövqeyinə etdiyi təsirinin kompleks qimətləndirilməsi // *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*. Bakı, – 2020, № 1, cild 12, s. 92-96.
3. Saikia M., Devi M., Barbara A.K., Sarmah H.K. Raindrop size distribution profiling by laser distrometer and rain attenuation of centimeter radio waves // *Indian Journal of Radio & Space Physics*, – 2009, Vol. 38, pp. 80-85.
4. Lee, I.-S., Ge, L. The performance of RTK GPS for surveying under challenging environmental conditions // *Earth Planets Space*, – 2006. Vol. 58, – p. 515-522.
5. Checa, R., Tapiador, F.J. A maximum entropy modeling of the rain drop size Distribution // *Entropy*, – 2011, vol. 13, – p. 293-315: 10.3390/e1302029.
6. Asadov H.G., Ismailov K.H. Informacionnyj metod pozicionirovaniya obyektov // – M.: *Informacionnye tekhnologii*, – 2011. № 9, – s. 37-39 (in Russia).

Redaksiyaya daxil olub: 30.08.2020  
Tamamlama işlərindən sonra: 14.06.2021  
Nəşrə qəbul edilib: 17.06.2021

## Pricing Asian Options with Monte-Carlo Method

E.A. Janahmadov

SAEQ LTD (Basevi Way, 68, London, SE8 3JS, United Kingdom)

**For correspondence:**

Janahmadov Elmar / e-mail: ejlabnet@gmail.com

**Abstract**

The paper is the Computational Finance project on pricing Asian options with the Monte-Carlo method. The certain discounted payoff formula is given under the risk-neutral density. The author reviews the arithmetic sampling payoff formula for fixed and floating strikes; the geometric sampling payoff formula for the fixed and floating strikes. In both cases the author use the Euler-Maruyama scheme for simulating the underlying stock price using the following set of data: today's stock price  $S_0 = 100$ ; strike  $K = 100$ ; time to expiry  $(T - t) = 1$  year; volatility  $\sigma = 20\%$ ; constant risk-free interest rate  $r = 5\%$ . As a result following is produced: outline of the numerical procedure; appropriate tables, comparisons and error graphs; analysis of observations and problems encountered.

**Keywords:** asian option, arithmetic sampling, geometric sampling, current price, fixed and floating strikes, time to expiry, volatility, interest rate.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_107\_112

**For citation:**

Janahmadov E.A.

[Pricing Asian Options with Monte Carlo Method]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 107 – 112 (in English).

## Asiya seçimlərinin Monte-Carlo metodu ilə qiymətləndirilməsi

**E.Ə. Canəhmədov**

SAEQ LTD (Basevi küç, 68, London, SE8 3JS, Böyük Britaniya)

### Yazışma üçün:

Canəhmədov Elmar / e-mail: ejlabnet@gmail.com

### **Annotations**

Məqalədə Monte-Carlo metodu ilə Asiya seçimlərinin qiymətlərini müəyyənləşdirməyə kömək edən bir Hesablama Maliyyəsi layihəsi aparılıb. Güzəştli ödəmə üçün xüsusi düstur neytral risk sıxlığında verilib. Müəllif fiksasiya olunan və üzən məzənnələr üçün ödənişlərin cəbri seçmə formulunu aşdırıb; fiksasiya olunan və üzən məzənnələr üçün həndəsi seçmə ilə düstur alıb. Hər iki halda da müəllif aşağıdakı verilənlər bazasından istifadə edərək əsas səhm qiymətini modelləşdirmək üçün Eyler-Maruyama sxemindən istifadə edib: bugünkü səhm qiyməti  $S_0 = 100$ ; məzənnə  $K = 100$ ; sona çatma müddəti ( $T - t$ ) = 1 il; dəyişkənlik  $\sigma = 20\%$ ; daimi risksiz faiz dərəcəsi  $r = 5\%$ . Nəticədə ədədi prosedurun sxemi; müvafiq cədvəllər, müqayisələr və səhvlerin qrafikləri; müşahidələrin və yaranan problemlərin təhlili əldə edilib.

**Açar sözlər:** asiya seçimi, cəbri nümunə, həndəsi nümunə, cari qiymət, fiksasiya olunan və üzən məzənnə, bitmə müddəti, dəyişkənlik, faiz dərəcəsi.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_107\_112

---

УДК: 519.2

## Ценообразование азиатских опционов по методу Монте-Карло

**Э.А. Джанахмедов**

SAEQ LTD (Basevi ул, 68, Лондон, SE8 3JS, Великобритания)

### Для переписки:

Джанахмедов Эльмар / e-mail: ejlabnet@gmail.com

### **Аннотация**

Статья представляет собой исследование Computational Finance по ценообразованию азиатских опционов с помощью метода Монте-Карло. Определенная формула дисконтированной выплаты дана при нейтральной к риску плотности. Автор рассматривает формулу арифметической выборки выплат для фиксированных и плавающих страйков, а также формулу выигрыша с геометрической выборкой для фиксированных и плавающих страйков. В обоих случаях автор использует схему Эйлера-Маруямы для моделирования базовой цены акции с использованием определенного набора данных: сегодняшняя цена акции  $S_0 = 100$ ; страйк  $K = 100$ ; срок до истечения срока ( $T - t$ ) = 1 год; летучесть  $\sigma = 20\%$ ; постоянная безрисковая процентная ставка  $r = 5\%$ . Исследована схема численной процедуры, а также даны соответствующие таблицы, сравнения и графики ошибок, анализ наблюдений и возникших проблем.

**Ключевые слова:** азиатский опцион, арифметическая выборка, геометрическая выборка, текущая цена, фиксированные и плавающие страйки, время до истечения срока, волатильность, процентная ставка.

## Introduction

Asian options are a type of exotic options with a payoff that depends on the average price of the underlying asset over the specified period. As such an Asian option might be less costly than an equivalent vanilla contract. Since it is quite hard to manipulate the average price over time than a single stock price, the Asian options are obvious choice for the commodity and energy market participants.

Asian options were first priced by David Spaughton and Mark Standish of Bankers trust. They developed the first commercially used pricing formula for options based on the average price of crude oil in 1987 while working in Tokyo, Japan. Hence, there is a name “Asian”.

As an exotic option, the Asian tail offers further protection against risk by reducing exposure to sudden movements in the underlying asset just before expiry.

One disadvantage of Asian options is that their prices are very hard to compute using standard techniques. Unlike European options, which can be priced using the classic Black-Scholes formula, there is no analytical formula for pricing an Asian option when the underlying asset is assumed to have a lognormal distribution.

## Option Payoff

By taking the payoff formula for the vanilla contract and replacing the current asset price with its average we get the formula forth average rate option payoff

Call max ( $A - K, 0$ )

*Put max ( $K - A, 0$ )*, (1)

where  $A$  – the average price of the underlying asset over some specified period;  $K$  – the strike price.

This payoff formula allows to lock in the price of the underlying asset over extended period time.

## Type of Sampling

The setting the payoff formula for the Asian call and put options, we must look into input parameters. The strike price is usually given by

the contract. In our project we will look into two types of strikes: fixed and floating. The second parameter is the average of the underlying asset price. Here, we are going to look into different types of averaging the price of underlying asset. The averaging for an Asian option depends on two factors:

- ❖ how the data points are combined to form an average;

- ❖ what data points to be used.

The first one points toward the type of sampling, such as the arithmetic and geometric sampling. The second one defines the data set, such as all quoted prices and the subset from the global data.

By definition, the *arithmetic average*  $A_a$  of the price is the sum of all the constituent prices equally weighted, divided by the total number of prices used

$$A_a^d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k, \quad A_a^c = \frac{1}{t} \int_0^t S(\tau) d\tau \quad (2)$$

The *geometric average*  $A_g$  is the exponential of the sum of all the logarithms of the constituent prices equally weighted, divided by the total number of prices used [Wilmott, 2016].

$$\begin{aligned} A_a^d &= \exp \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \log S_k \right), \\ A_g^c &= \exp \left( \frac{1}{t} \int_0^t \log S(\tau) d\tau \right) \end{aligned} \quad (3)$$

With respect of what data points to be used, we can identify the continuously samples average, and the discretely sampled average.

The *continuously sampled average*  $A^c$  is called the sum of closely spaced prices taken over a finite time in such way, that average become integrals of the asset over the averaging period.

The *discretely sampled average*  $A^d$  is called the data points of the set of reliable closing prices over small time period.

In our project we will look at the continuous arithmetic and geometric sampling with fixed and floating strikes.

## Solution methods

In order to solve our problem, we have two methods: the partial differential equation approach and the Monte Carlo method. Although, the partial differential method is faster and more flexible, it is much harder to code. The Monte Carlo method is much easier to code. Under the Monte Carlo method, the value of option is the present present value of the expected payoff under a risk neutral random walk

$$V(S, t) = E^Q \left[ \exp - \int_t^T r_\tau d\tau \text{Payoff}(S_T) \right] \quad (4)$$

The pricing algorithm is following [Wilmott, 2016]:

1. Simulate the risk-neutral random walk starting at today's value of the asset over the required time horizon. This gives one realization of the underlying price path;
2. For this realization calculate the option payoff;
3. Perform many more such realizations over the time horizon;
4. Calculate the average payoff over all realizations;
5. Take the present value of this average, this is the option value.

As part of the exercise we have chosen following parameters for pricing Asian call options: today's stock price  $S_0 = 100$ ; strike  $K=100$ ; time to expiry ( $T-t=1$  year); volatility  $\sigma = 20\%$ ; constant risk-free interest rate  $r = 5\%$ . We set the time-steps at 100, while varying then number of replications from 10 to  $10^8$ .

In this report we consider the Asian call options based on their strike type and the sampling choice with following payoff formulas for each type (here, we replace for average with to avoid confusion with Arithmetic):

1. Arithmetic sampling: fixed strike

$$C_{afx} = \max(V_a - K, 0), \quad (5)$$

2. Arithmetic sampling: floating strike

$$C_{afl} = \max(S_T - V_a, 0), \quad (6)$$

3. Geometric sampling: fixed strike

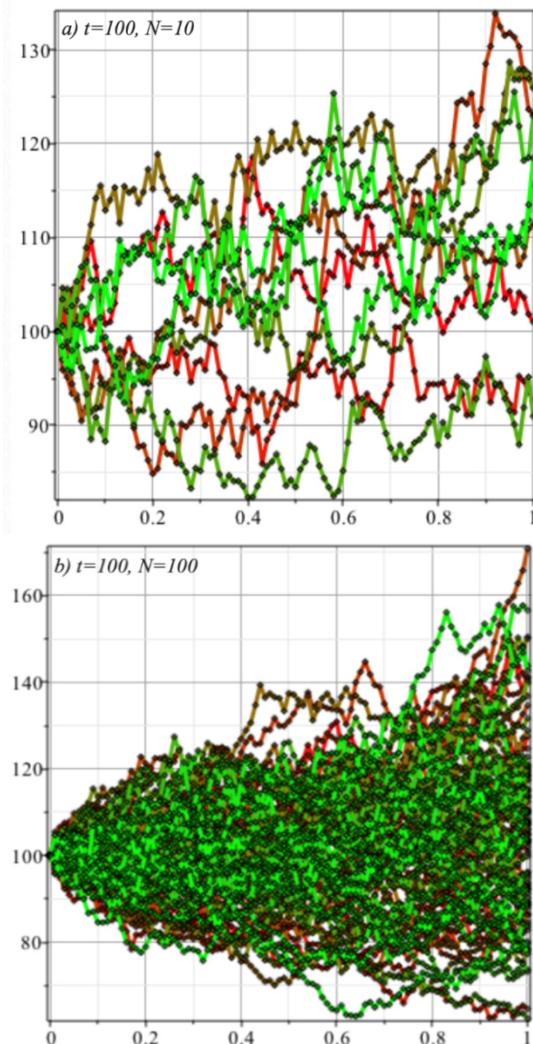
$$C_{gfx} = \max(V_g - K, 0), \quad (7)$$

4. Geometric sampling: floating strike

$$C_{gfl} = \max(S_T - V_g, 0), \quad (8)$$

We use Maple as a primary choice of software to generate a path base on following formula

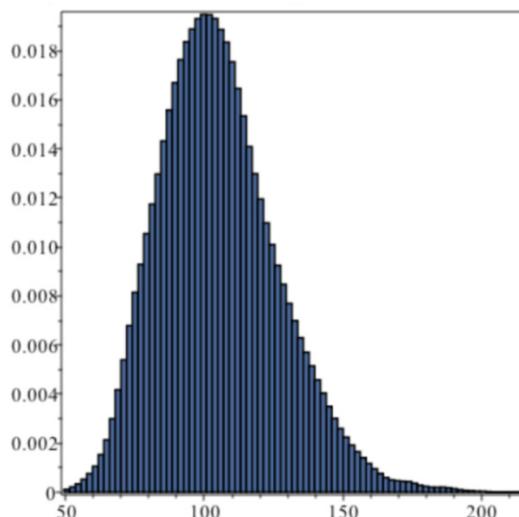
$$S_{t+\delta t} = S_t(1 + r\delta t + \sigma\phi\sqrt{\delta t}) \quad (9)$$



**Figure 1.** The MonteCarlo method for  $N$  replications

Figures 1 (a–b) compares of the replicated stock prices with the fixed  $t = 100$  time-steps and varying number of replications  $N = 10$  and  $N = 100$ . Having  $N = 100$  and above ensures the normal distribution of the asset prices. Although, any values for  $N > 10^8$  is beyond the scope of this work, since the limit capacity of the employed computer. We use the regular MACBOOKPro with Processor 3 GHz Intel Core i7 and Memory 16 GB 1600 MHz DDR3. All prices are rounded up to three decimal

places, as if you pay cash, the more detail prices are provided in Workbook01.xls.



**Figure 2.** The MonteCarlo asset price distribution

The analytical solution of PDE for Asian Call Option provides us with the initial price as 5.763. We gonna use it as reference to find the price approximation for our simulation model.

The standard error is provides by the Maple Statistics package (library) based on formula.

$$\epsilon_N = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

Table 1 shows he error factors in pricing Asian Options for each type of options.

**Table 1.** The error factor in pricing of Asian options (call-put)

Number of simulations	Arithmetic				Geometric				
	Fixed		Floating		Fixed		Floating		
	N	Call	Put	Call	Put	Call	Put	Call	Put
10	3.766	1.842	5.159	0.356	3.380	1.249	2.520	2.335	
100	0.979	0.618	0.952	0.568	0.704	0.627	0.906	0.517	
1000	0.270	0.182	0.279	0.166	0.248	0.187	0.315	0.172	
10000	0.084	0.054	0.091	0.055	0.081	0.058	0.091	0.053	
100000	0.026	0.017	0.029	0.017	0.025	0.018	0.030	0.017	
1000000	0.008	0.005	0.009	0.005	0.008	0.006	0.009	0.005	
10000000	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	
100000000	0	0	0	0	0	0	0	0	

We start our analysis by comparing prices for Asian Call Options at the money ( $S_t = K$ ). Table 2 shows prices for Asian Options at  $S_t = K = 100$ .

**Table 2.** The prices of Asian options (call-put) at the money

Number of Simulations	Arithmetic				Geometric				
	Fixed		Floating		Fixed		Floating		
	N	Call	Put	Call	Put	Call	Put	Call	Put
10	7.445	2.533	5.960	1.838	6.418	1.251	3.149	5.555	
100	4.783	4.299	6.299	3.900	6.102	4.231	5.159	3.073	
1000	5.294	3.205	6.051	3.645	5.081	3.519	5.869	3.246	
10000	5.881	3.334	5.856	3.410	5.568	3.423	6.050	3.182	
100000	5.682	3.349	5.938	3.418	5.503	3.460	6.115	3.317	
1000000	5.722	3.323	5.900	3.432	5.507	3.443	6.123	3.300	
10000000	5.714	3.323	5.908	3.428	5.499	3.441	6.121	3.301	
100000000	5.715	3.322	5.911	3.428	5.500	3.440	6.119	3.300	

As we can see from Table 2, the prices become more stable after  $N > 10^6$  replications. If you have to pick, then most expensive option that will be Geometric Floating Strike Asian Call Option. The cheapest is also Geometric but Fixed Strike Asian Call Option.

Next, we look at Asian Call Option out the money ( $S_t < K$ ). Table 3 shows prices for Asian Options at  $K > S_t = 90$ .

As we can see from Table 3, the prices also become more stable after  $N > 10^6$  replications. If you have to pick, then most expensive option that will be Geometric Floating Strike Asian Call Option. The cheapest is also Geometric but Fixed Strike Asian Call Option.

Next, we look at Asian Call Option in the money ( $S_t > K$ ). Table 4 shows prices for Asian Options at  $K < S_t = 110$ .

As we can see from Table 4, the prices become more stable after  $N > 10^6$  replications. If you have to pick, then most expensive option that will be Arithmetic Fixed Strike Asian Call Option. The cheapest is Arithmetic Floating Strike Asian Call Option.

**Table 3.** The prices of Asian options (call-put) out the money

Number of Simulations	Arithmetic				Geometric				
	Fixed		Floating		Fixed		Floating		
	N	Call	Put	Call	Put	Call	Put	Call	Put
10	0.898	9.626	5.045	1.126	1.976	8.148	8.488	4.794	
100	1.567	10.045	4.853	2.737	1.251	7.596	5.430	2.941	
1000	1.824	8.780	5.351	3.280	1.424	9.113	5.727	3.072	
10000	1.522	8.817	5.235	3.060	1.411	9.060	5.537	2.907	
100000	1.528	8.886	5.331	3.065	1.415	9.073	5.512	2.974	
1000000	1.537	8.886	5.304	3.083	1.413	9.072	5.514	2.973	
10000000	1.536	8.892	5.317	3.085	1.413	9.070	5.512	2.972	
100000000	1.536	8.892	5.317	3.085	1.413	9.070	5.512	2.972	

By looking at these tables and comparing the rates of change of derivative per 10% move in the underlying up or down, we can say that Asian Options with Fixed Strike are more sensitive to the movement of the underlying. Meanwhile, Asian Option with Floating Strike, especially the Geometric Floating Strike Asian Options, act more like a damper by reducing the oscillation in underlying price.

The call-put parity doesn't hold in the standard definition. The asset price on the right hand side of equality actually represents the average underlying price.

**Table 4.** The prices of Asian options (call-put) in the money

Number of Simulations	Arithmetic				Geometric				
	Fixed		Floating		Fixed		Floating		
	N	Call	Put	Call	Put	Call	Put	Call	Put
10	20.710	0.303	6.060	1.805	15.027	0.660	6.550	2.848	
100	14.544	1.068	5.350	2.690	12.261	0.942	6.968	4.418	
1000	12.963	0.881	6.302	3.529	12.731	0.865	6.668	3.707	
10000	13.070	0.879	6.666	3.794	12.644	0.963	6.731	3.551	
100000	12.990	0.860	6.538	3.754	12.674	0.938	6.756	3.629	
1000000	12.994	0.862	6.503	3.778	12.689	0.926	6.722	3.624	
10000000	13.006	0.860	6.505	3.770	12.703	0.929	6.728	3.631	
100000000	13.005	0.861	6.502	3.770	12.706	0.929	6.731	3.631	

## Conclusion

Here are the major points of our research:

The Euler method generates the lognormal distributed asset prices.

The higher the number of repetitions the more accurate the price of derivative.

Asian Arithmetic Fixed Call Option is more sensitive to the price movement of underlying asset.

Asian Geometric Floating Call Option is less sensitive to the price movement of underlying asset.

The call-put parity doesn't hold in the standard definition. The asset price on the right hand side of equality actually represents the average underlying price.

## REFERENCES

1. Paul Wilmott. On Quantitative Finance (Part 2), 2016.
2. Maple Help [<http://fr.maplesoft.com/support/help/index.aspx>].
3. CQF Lectures Notes for Module 03.
4. Janahmadov E.A. Comparative analysis of trading systems performances with respect to transaction costs (Part II) // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, Vol.13, 2021. Pp. 97-102.

Received: 05.01.2021  
 Reviewed: 14.06.2021  
 Accepted for publication: 19.06.2021

## **Some Evaluation Aspects of Atmospheric Aerosol in Industrial Centers on The Basis Ofsatellite Information**

**B.M. Azizov, Kh.S. Khalilova**

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

**For correspondence:**

Khalilova Khadija / e-mail: x.xalilova@mail.ru

**Abstract**

The main purpose of the study of atmospheric aerosols is to determine their impact on the Earth's radiation balance and climate change on a regional and global scale. Because aerosols vary in size, shape, composition, and duration in the atmosphere, they are evaluated in the terrestrial atmosphere and at different altitudes via satellite systems. In the article under review, the study of atmospheric aerosols in large industrial centers was carried out on the basis of mutual analysis of surface and satellite data. It has been shown that the correct estimation of aerosol attenuation of the signal depends directly on the choice of spectral wavelength (0.4  $\mu\text{m}$  to 11.3  $\mu\text{m}$ ). Surface measurement results, data from Landsat-7.8 and AZERSKY satellites were used in the research. The article focuses on the assessment of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  and large dispersed aerosols, which are typical for industrial centers.

**Keywords:** aerosol, atmosphere pollution, measurements, synchronous, quasicynchronous observations, spectrum, anthropogenic factor, spectral decomposition.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_113\_120

**For citation:**

*Azizov B.M., Khalilova Kh.S.*

[Some Evaluation Aspects of Atmospheric Aerosol in Industrial Centers on The Basis Ofsatellite Information]  
*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, vol. 13, № 2. Pp. 113 –120 (in Azerbaijan).

## Peyk informasiyası əsasında sənaye mərkəzlərində atmosfer aerozollarının qiymətləndirilməsinin bəzi aspektləri

B.M. Əzizov, X.S. Xəlilova

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan prospekti 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

### Yazışma üçün:

Xəlilova Xədicə / e-mail: x.xalilova@mail.ru

### **Annotasiya**

Atmosfer aerozollarının tədqiqində əsas məqsəd onların regional və qlobal miqyasda Yerin radiasiya balansına və iqlim dəyişmələrinə təsirini müəyyənləşdirməkdir. Aerozolların ölçüləri, forması, tərkibi və atmosferdə müddətləri olduqca fərqli xarakter daşıdığından onların qiymətləndirilməsi yerüstü atmosferdə və peyk sistemləri vasitəsilə müxtəlif hündürlüklərdə həyata keçirilir. Baxılan məqalədə iri sənaye mərkəzlərində atmosfer aerozollarının tədqiqi yerüstü və peyk məlumatlarının qarşılıqlı analizi əsasında aparılmışdır. Göstərilmişdir ki, siqnalın aerozol zəifləmələrinin düzgün qiymətləndirilməsi bilavasitə spektral dalğa uzunluğunun (0.4 mkm-dən 11.3 mkm-ə kimi) seçilməsindən asılı olur. Araşdırmlarda yerüstü ölçmə nöticələri, Landsat-7,8 və AZERSKY peykindən alınmış məlumatlardan istifadə olunmuşdur. Məqalədə əsas diqqət sənaye mərkəzləri üçün xarakterik olan NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> və iri dispersiv aerozolların qiymətləndirilməsinə yönəldilmişdir.

**Açar sözlər:** aerozol, atmosfer çirkənməsi, kvazisinxron müşahidələr, antropogen amil, spektral bölünmə, aerokosmik məlumatlar.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_113\_120

**УДК:** 5.52.528.7

## Некоторые аспекты оценки атмосферных аэрозолей в промышленных центрах на основе спутниковой информации

**Б.М. Азизов, Х.С. Халилова**

Национальная академия авиации Азербайджана (Мардакянский проспект, 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

### Для переписки:

Халилова Хадиджа / e-mail: x.xalilova@mail.ru

### **Аннотация**

Основная цель исследования атмосферных аэрозолей – определение их влияния на радиационный баланс Земли и изменение климата в региональном и глобальном масштабе. Аэрозоли различаются по размеру, форме, составу и продолжительности пребывания в атмосфере и оцениваются в земной атмосфере и на разных высотах с помощью спутниковых систем. В статье приведены результаты исследования атмосферных аэрозолей в крупных промышленных центрах, которое проводилось на основе взаимного анализа наземных и спутниковых данных. Показано, что правильная оценка аэрозольного ослабления сигнала напрямую зависит от выбора спектральной длины волны (от 0,4 мкм до 11,3 мкм). В исследовании использованы результаты измерений поверхности, данные спутников Landsat-7.8 и AZERSKY. Даны оценка NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и крупнодисперсных аэрозолей, характерных для промышленных центров.

**Ключевые слова:** аэрозоль, загрязнение атмосферы, измерения, синхронный, квазисинхронные наблюдения, спектры, антропогенный фактор, спектральное разделение.

## Giriş

Məlumdur ki, aerozol atmosferin sərhəd qatıdır və əsas konsentrasiyası yerdən 1000 m-ə kimi hündürlükdə paylanır. Aerozol yerdə iqlimi formalaşdırın amil olmaqla yanaşı insan sağlamlığına ciddi təsir göstərir [1, 3]. Aerozol atmosfer sərhəddində günəş radiasiyasını udaraq və səpələyərək temperaturun şaquli paylanmasına təsir göstərir və nəticədə atmosferin baxılan sərhəddində onun dinamikasını və istilik rejimini dəyişir. Bu səbəbdən iqlim dəyişmələri və ətraf mühitə aerozolların göstərdiyi təsirin nəzərə alınması müasir atmosfer tədqiqatlarının əsas problemlərindən biridir. Bu problem sənaye mərkəzləri üzərində olan atmosfer üçün daha önemlidir. Müasir model hesablamaları göstərir ki, atmosfer aerozollarının günəş radiasiyasına və onunla əlaqədar ətraf mühitə təsir göstəricilərinin düzgün nəzərə alınması ətraf mühit və iqlim göstəricilərinin nisbətən düzgün proqnozlaşdırılmasına imkan verir. Düzgün proqnozlaşdırmanın əsas göstəricilərindən biri isə onun optik-mikrofiziki parametrlərinin düzgün təyin olunmasından asılıdır.

Atmosfer sərhəddində atmosferin optik xarakteristikalarının düzgün qiymətləndirilməsi bilavasitə yerüstü ölçmə nəticələri ilə (meteostansiyalarda və səyyar nəzarət ölçü komplekslərində) peyk ölçmə nəticələrinin qarşılıqlı müqayisəsi ilə alınmış nəticələrin analizi əsasında ölçü xətalarının qiyməti və onları yaradan səbəbləri aşadırmaq imkanı əldə olunur. Bu məqsədlə peyk sistemləri vətəsilə spektrin müxtəlif dalğa uzunluqlarında atmosferin şəffaflığının qiymətləndirilməsi yuxarıda qeyd olunan bu və ya digər məsələləri həll etmək mümkündür.

## Material və metod

Hal-hazırda atmosfer aerozollarının məsafədən qiymətləndirilməsinin müxtəlif üslulları mövcuddur. Bunlardan ən geniş yayılmışları-kombinasiya üsulu, atmosferin şəffaflıq üsulu, temperaturun hündürlüyü görə paylanması üsulu və infraqırmızı ölçmə üsullarıdır. Hər bir üsulun özünəməxsus üstünlükleri və çatışmazlıqları mövcuddur. Baxılan məqalədə atmosferin şəffaflıq üsulundan istifadə olunmuşdur. Bu, ilk növbədə, ölçmə avadanlığı kimi istifadə olunan sistemlə bağlıdır. Bizim araşdırımlarda Ölçü sistemləri kimi AZERSKY və LANDSAT-7,8 materiallarının istifadə olunduğundan atmosferin şəffaflıq metodu daha optimal hesab olunur. Belə ki, baxılan sistemlərdə istifadə olunan radioimetrlər günəş radiasiyasının aerozollar tərəfindən udulması və səpələnməsi nəticəsində atmosferin optik sıxlığında baş verən dəyişiklikləri kəmiyyət və keyfiyyətcə qiymətləndirilmədə ölçmə xətalarının qiyməti digər metodlara nisbətən daha aşağı olur. Digər tərəfdən baxılan metodla alınan informasiyanın emalı nisbətən sadə olur. İformasiyanın emalı müasir emal programı olan Erdas Imagine-də aparılmışdır.

## Təhlil və müzakirə

Məqalə atmosfer çirkənməsinin kosmik məlumatlar əsasında qiymətləndirilməsinin analizi və ölçmə metodları haqqında məlumatların ümumiləşdirilməsinə həsr olunur. Göstərilmişdir ki, atmosferin tərkibində dəyişikliklərin, xüsusən aerozolun konsentrasiyasının dəyişməsi ölçmə nəticələrinə ciddi təsir göstərir. Bu təsir özünü aerozolların ölçülərindən, hündürlük üzrə paylanmasıdan və növ tərkibindən asılı olaraq dəyişir.

## Məsələnin qoyuluşu

Məlum olduğu kimi, sənaye şəhərləri üzərindəki aerozol sahələrinin formalaşma prosesinin mürəkkəbliyi və onların kimyəvi tərkibinin, dispersliyinin müxtəlifliyi ilə bağlı mikrofiziki xüsusiyyətləri, optik diapazonun müxtəlif spektral zonalarında çox sayıda ölçülü mələrin keçirilməsini tələb edir. Atmosfer aerozolunun optik qalınlığı həm təbii, həm də antropogen amillərdən asılı olaraq sutkaliq, mövsümi və illərarası tərəddüdlərə məruz qalır. Təcrübələr göstərir ki, iri dispersli aerozol ların (təbii və sənaye tozlarının) kəmiyyət və keyfiyyətcə qiymətləndirilməsində atmosferin şəffaflıq metodu digər metodlara nisbətən daha optimal hesab olunur. Tədqiqatlar aparıllarkən atmosferin dinamikliyinə təsir göstərən meteoroloji göstəricilər nəzərə alınmalıdır.

## Məsələnin həlli

Son illər atmosfer çirkənmələrinin əsas səciyyələndirici səbəblərdən biri aerozol çirkənmələri hesab olunur. Aerozol çirkənmələri həm təbii, həm də antropogen xarakterli olduğundan, onların bir-birindən fərqləndirməsi kəmiyyət və keyfiyyətcə qiymətləndirmə məsələləri müasir atmosfer tədqiqatlarının əsas problemlərdən biri hesab olunur. Onların peyk üsulu vasitəsilə qiymətləndirilməsi xüsusilə iri sənaye şəhərləri üçün mühüm xüsusiyyətə malikdir.

Baxılan məqalədə müxtəlif mənşəli və müxtəlif ölçüyü aerozol çirkənmələrinin qiymətləndirmə üsullarına baxılmış və göstərilmişdir ki, digər atmosfer çirkənmərindən fərqli olaraq aerozol çirkənmələrinin qeydə alınması fərqli xüsusiyyətlərə malikdir. Xüsusi silə spektrin müxtəlif diapazonunda aparılan ölçmələr aerozol çirkənmələrinin digər çirkənmələrdən fərqləndirilməsini təmin edə bilir.

Sənaye şəhəri üzərindəki atmosferin aerozol çirkənməsi təbii qlobal proseslərdən, sənaye tullantılarının həcmindən, həm də qarışıqların yiğilmasından, yaxud əksinə atmosferin təmizlənməsinə səbəb olan metereoloji şəraitdən asılıdır. Meteoroloji və spektrometrik məlumatların müasir interpretasiyası şəhər atmosferinin aerozol optik qalınlığının dəyişkənliyinin qiymətləndirilməsinə imkan verir [1, 2, 3].

Kosmik informasiyalar əsasında atmosfer çirkənməsinin iki növü analiz olunur. Bunlardan biri molekulyar təsirə malik qaz hissəcikləri (Reley və Mi səpələnməsi), digəri isə çoxlu sayıda bərk aerozol hissəcikləri hesab olunur. Təbii aerozollar əsasən, meşə, ot yanğınlarının, toz burulğanlarının və vulkan püşkürməsi nəticəsində yaranır. Antropogen mənşəli aerozollar isə insan fəaliyyəti nəticəsində, əsasəndə enerji istehsalı proseslərində yaranır.

Atmosferdə aerozol çirkənmələri haqqında informasiya verən üç kosmik informasiya mənbəyini göstərmək olar:

1. Spektrin müxtəlif oblastlarında, Yerin təsvirinin analiz metodu;
2. Trayektoriyanın formasına əsasən Günəşə görə atmosferin şəffaflığının ölçmə metodu;
3. “Yer-Atmosfer” sistemi tərəfindən əks olunan və səpələnən Günəş şüalanmasının ölçmələrinin nəticələrinin şərhinə əsaslanan metod.

Birinci üsul, yalnız aerozolların fəzada paylanması digər iki üsul isə atmosfer aerozollarının optik xüsusiyyətləri baxımından qiymətləndirməyə imkan verir [3, 4].

Qeyd olunan üsulların mahiyyətinin araşdırılması məqsədi ilə atmosferin aşağıdakı optik parametrləri haqqında bəzi məlumatları nəzərdən keçirək:

*Atmosferin optik parametrləri.* Yer atmosferində işıq selinin atmosferlə qarşılıqlı əlaqəsini müəyyənləşdirən əsas göstəricilər: k-udulma,  $\sigma$ -səpələnmə və  $\chi$  ( $\sigma_{\text{mol}}$ ) atmosferin yayım indikatoru (göstəricisi) kimi parametrlər müəyyən olunur. Spektrin görünən hissəsində udulma çox az olduğu üçün onu nəzərə almamaq olar. Molekulyar (reley) və aerozol səpələnmələri isə fərqlənirlər.

Molekulyar səpələnmə göstəricisi  $\sigma_{\text{mol}}$  yaxşı məlumdur. Atmosferin yerətrafi qatlarında  $\lambda=0.55$  dalğa uzunluğunda, onun qiyməti  $\sigma_{\text{mol}} (\lambda=0.55 \text{ mkm}) = 0.0119 \text{ km}^{-1}$ -dir.

$\sigma_{\text{mol}}$  göstəricisinin, şüalanmanın dalğa uzunluğundan asılılığı aşağıdakı kimidir.

$$\sigma_{\text{mol}} (H, \lambda) = \sigma_{\text{mol}} (\lambda=0.55 \text{ mkm})$$

Burada  $\sigma_{\text{mol}} (H, \lambda)$  - molekulyar səpələnmənin hündürlük və dalğa uzunluğundan asılılıq funksiyasıdır.

Hündürlüyə görə molekulyar səpələnmə göstəricisi eksponensial qanunla dəyişir.

$$\sigma_{\text{mol}} (H, \lambda) = \sigma_{\text{mol}} (0, \lambda) \exp (H/H_{\text{mol}}).$$

Burada  $H_{\text{mol}}=8 \text{ km}$  - molekulyar atmosferin effektiv hündürlüyüdür. Molekulyar yayım indikatrisası isə  $\chi_{\text{mol}}(\sigma_{\text{mol}}) = 0.75 (1+\cos^2 \sigma_{\text{mol}})$  ifadəsi ilə tapılır.

Atmosferin aerozolla çirkənməsinin aerokosmik monitorinqi sistemi. Atmosferin aerozolla çirkənməsinin aerokosmik monitorinqi, spektrin ultrabənövşəyi görünən və yaxın infraqırmızı diapazonlarda aparılır. Spektrin bu diapazonlarında udulma və səpələnmə proseslərinə aerozoldan əlavə, atmosferin digər aktiv optik komponentləri təsir göstərə bilər. Onlara ozon, azot dioksidi və başqları misal ola bilər. Aerozol komponentlərinin parametrlərinin bərpasına birkanlı ölçülərdən çoxkanallı (çoxspektrallı, çoxbucaqlı və ya spektral-bucaqlı) ölçülərə keçməklə nail olmaq olar. Onların məsələnin

həllinə təsirinin göstəricilərinin müəyyənləşdirilməsi üçün çoxkanallı ölçmə üsullarının nəticələrindən istifadə olunur. Belə ölçmə avadanlıqları Landsat, Spot, Aqua, Sentinel, NOAA və digər müasir peyk sistemlərində tətbiq olunur [3, 5, 6, 7].

Araşdırmlarda biz əsasən AZERSKY (Spot-6) və Landsat-8 peykində quraşdırılmış skaner təsvirlərindən istifadə etmişik. Aşağıda həmin sistemin əsas texniki xarakteristikaları verilmişdir:

#### AZERSKY (Spot-6)

a) Spektral diapazonlar, mkm:

Panxromatik: 0.450-0.475 I kanal – göy,

0.450-0.520; II kanal – yaşıl; 0.530-0.590

II kanal – qırmızı; 0.625-0.695

III kanala yaxın infraqırmızı; 0.760-0.890

b) Müşahidə zonasının eni-60 km

c) Radiometrik ayırdetməsi -  $2^{12}$ - qradasiya

d) Fəza ayırdetməsi: Panxromatikdə-1.5

m, multispektral-10 m

#### Landsat-8

a) Spektral diapazonlar, mkm:

I kanal – sahilyanı və aerozol; 0,433-0,453 mkm; II kanal – göy; 0,450-0,515 mkm; III kanal – yaşıl; 0,525-0,600 mkm IV kanal – qırmızı; 0,630-0,680 mkm V kanala yaxın infraqırmızı; 0,845-0,885 mkm

b) Müşahidə zonasının eni-30 km

#### Akkumulyasiya metodu.

Atmosfer tərəfindən zəiflədilmiş Günəş şüalanmasının ölçüməsi qeyd olunmuş çoxkanallı skaner ilə aparılmışdır: dalğa uzunluğunun işçi diapazolu-0,45, 0,89 mkm, spektral kanallarının sayı 5 olmuşdur. Aerozol qalınlığı, spektral sahədə 0.45...0.53 mkm və 0.75...0.83 mkm, ozonun udma zolağından kənarda 0.55...0.73 mkm müəyyən edilmişdir (burada Günəş radiasiyası ozon tərəfindən az miqdarda udulur). Aerozolun zəifləmə göstəricisinin şaquli profilinin

bərpası, ölçülən qalınlığa görə statik tənzimləmə metodu ilə aparılır. Aerozolun zəifləmə göstəricisinin profili  $h>10$  km hündürlük oblastında bərpa olunur. Təcrübələrin nəticələri aerozol qatının əsasən 14...20 km, 25 km və 32 km-də formalaşmasını müəyyənləşdirmişdir.

*Bucaq metodu.* Bu metodda nadir xəttinə nəzərən simmetrik yerləşmiş iki istiqamətdə buraxılmış şüalanmaların işıqlanmasının ölçülməsi ilə atmosferin optik qalınlığının tapılmasına yönəlmışdır.

Peykin qabaq hissəsində yerləşdirilmiş üçkanallı telefotometr, uçuş istiqamətinə perpendikulyar istiqamətdə skanerləşir və Yerin əks etdirdiyi radiasiyanın işıqlanmasını da spektral intervalda ölçür. Bu interval 0.34; 0.47 və 0.75 mkm-də mərkəzləşmişdir. Bucaq metodunun əsas üstünlüyü ondan ibarətdir ki, müxtəlif dispersiyalı aerozolların qiymətləndirilməsi müxtəlif bucaqlar altında daha effektiv olur. Ölçmələr nadirdən  $\pm 3 - 10^\circ$  bucaq altında aparılmışdır. Sənaye şəhərlərində temperatur təyin olunmasında da aerozolların təsirinin qiymətləndirilməsi böyük əhəmiyyətə malik olur [6, 7].

Temperaturun tapılmasında əsas maneə, atmosferdə aerozolun və su buxarının olmasıdır. Əgər ikiölülü kanalları üçün su buxarının udma səviyyəsi fərqlidirse, onların nisbəti sabitdirse, onda ikikanallı ölçmə su buxarının hesablanması (qeydiyyatını) kifayət qədər dəqiqliklə təmin edir. Göstərilən şəraitlər mərkəzlər mkm-də olan, 1 mkm spektral intervalları üçün yerinə yetirilir. Belə ikikanallı ölçmələrə görə temperaturun tapılma xətası aerozolların nəzərə alınmaması, dəniz səthinin şüalanma əomsalı və aparat küyü ilə bağlıdır.

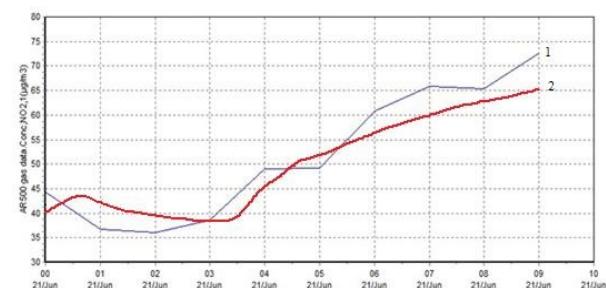
Yuxarıda qeyd olunduğu kimi, iri sənaye şəhərlərində atmosferin aerozol çirkəl-

mələrinə müxtəlif təsirlər, o cümlədən avtomobil nəqliyyatı təsir göstərir. Bu təsirin xüsusiyyətini qiymətləndirmək üçün Bakı şəhəri üzərində aerozol çirkənmələrinin paylanma göstəriciləri əsasında, nəqliyyatın intensivliyinin böyük olduğu Heydər Əliyev prospektində çirkənmələrin paylanma xüsusiyyəti nəzərdən keçirilmişdir.

Aşağıdakı şəkillərdə Heydər Əliyev prospektində 2019-cu ilin iyun ayında aparılmış ölçmə nəticələri göstərilmişdir. Şəkil 1-də  $\text{NO}_2$ -nin, Şəkil 2-də isə  $\text{SO}_2$ -nin sutka ərzində (gecə saat 00<sup>00</sup>- dan gündüz saat 10<sup>00</sup>-a kimi) alınmış yerüstü və peyk məlumatları öz əksini tapmışdır.

Qrafiklərdən görünür ki, hər iki çirkələndirici qaz üçün konsentrasiyanın qiyməti saat 04<sup>00</sup> və 05<sup>00</sup>-dan etibarən artmağa başlayır. Bu isə bilavasitə nəqliyyatın intensivliyinin artması ilə əlaqədardır. Aparılan tədqiqatların nəticələri göstərir ki, nəqliyyatın intensivliyinin dəyişməsi baxılan qazların konsentrasiyasının kəskin artmasına səbəb oldu.

Məsələn,  $\text{NO}_2$  üçün gecə saatlarında konsentrasiyanın qiyməti  $35-40 \text{ mq/m}^3$  olduğu halda, 08<sup>00</sup>- 09<sup>00</sup> radələrində bu qiymət təqribən iki dəfəyədək artaraq  $70-75 \text{ mq/m}^3$  təşkil edir [7].



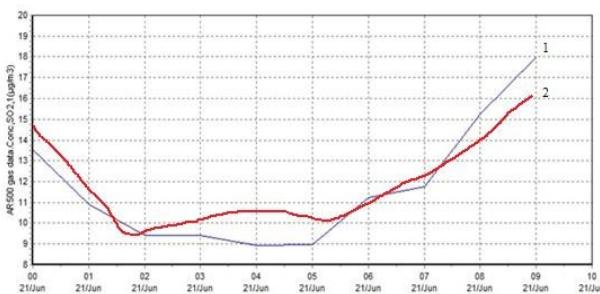
1. Yerüstü ölçmə nəticələri 2. Peyk məlumatları əsasında

Şəkil 1 – 2019-cu ilin iyun ayında sutka ərzində  $\text{NO}_2$ -nin konsentrasiyasının dəyişmə qrafiki

Figure 1 – Schedule of changes in the concentration of  $\text{NO}_2$  during the day in June 2019

Analoji olaraq  $\text{SO}_2$  qazı üçün gecə saatlarında bu qiymət  $8\text{-}10 \text{ mg/m}^3$  olduğu halda, saat  $08^{\text{00}}\text{-}09^{\text{00}}$  arasında bu qiymət  $2\text{-}2.5$  dəfə artaraq  $17\text{-}18 \text{ mg/m}^3$  təşkil edir.

Yuxarıda qeyd etdi ki, H. Əliyev prospektində atmosferi çirkənləndirən göstəricilərdən biri də, tozun konsentrasiyasının dəyişməsidir. Ölçmələr iyun ayının 12-dən 21-ə kimi müddətdə aparılmış və müəyyən olunmuşdur ki, tozun konsentrasiyası müxtəlif günlərdə müxtəlif qiymətə malik olmuşdur. Aparılan ölçmələr nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, baxılan günlərdə ən böyük, ən yüksək konsentrasiya iyunun 14-də qeydə alınmışdır. Bunun əsas səbəbi meteoroloji məlumatlara görə, qum fırıldaları meydana gəlmışdır [6, 7].

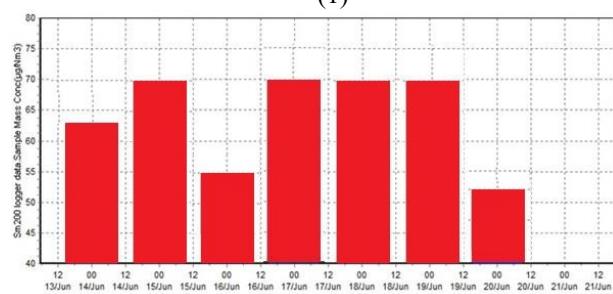
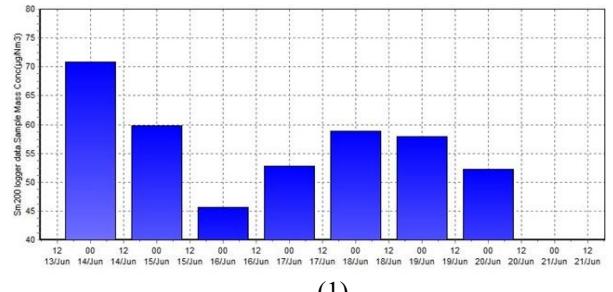


1. Yerüstü ölçümlər nəticələri. 2. Peyk məlumatları əsasında

**Şəkil 2 – 2019-cu ilin iyun ayında sutka ərzində  $\text{SO}_2$ -nin konsentrasiyasının dəyişmə qrafiki**

**Figure 2 – Schedule of change in  $\text{SO}_2$  concentration during the day in June 2019**

Şəkil 1, 2 və 3-də yerüstü ölçümlər nəticələri və peyk məlumatları əsasında alınmış qiymətlər arasındaki fərq ilk növbədə ölçü məsafəsi arasındakı fərqlər, peyk ölçmələrinə digər amillərin (xüsusən atmosfer səpələnmələrinin peyk ölçü sistemlərinin xətalar və peyk informasiyasının emalı prosesində yaranan xətalar) təsiri nəticəsində yaranır



1. Yerüstü ölçümlər nəticələri 2. Peyk məlumatları əsasında

**Şəkil 3 – İyun ayının 13-dən 21-ə kimi atmosferin tərkibində tozun konsentrasiyasının dəyişmə diaqramı**

**Figure 3 – Diagram of changes in the concentration of dust in the atmosphere from 13 to 21 June**

**Cədvəl 1. Atmosfer Havasının çirkənləndiricilərinin Yol Verilən Qatlılıq Həddləri (YVQH)**

**Table 1. Permissible Concentrations of Atmospheric Air Pollutants (PC)**

Çirkənləndiricilər	YVQH-ləri ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ortalama dövrü
Benzol	5	1 il
Toluol	-	-
Para-Ksilol	-	-
NO <sub>2</sub>	200	1 saat
SO <sub>2</sub>	350	1 saat
O <sub>3</sub> (Ozon)	120	8 saat
PM10	50	1 gün

Cədvəldə çirkənmə dərəcəsinin səviyyəsini təyin etmək məqsədi ilə qiymətləndirilən çirkənləndiricilərin yol verilə bilən qatlılıq həddlərinin qiymətləri verilmişdir.

## Nəticə

-Sənaye mərkəzlərində atmosferdə gedən proseslərin izlənilməsi bilavasitə Peyk məlumatları əsasında həyata keçirilir. Müəyyən olunmuşdur ki, aerozol konsentrasiyasinın dəyişməsi atmosferin optik sıxlığına təsir göstərir. Aerozolun konsentrasiyasından asılı olaraq baxılan dövr üçün optik sıxlıq  $10\% \div 35\%$ -ə kimi azalmağı müşahidə edilmişdir.

- Müəyyən edilmişdir ki, sənaye şəhərlərinin istehsal strukturundan asılı olaraq atmosferə atılan çirkəndiricilərin növ tərkibi müxtəlif olur. Bizim tədqiqatlarda əsasən NO<sub>2</sub> və SO<sub>2</sub>-nin konsentrasiyalarının dəyiş-

mə xüsusiyyəti analiz olunub və müxtəlif spektral diapazonda onların konsentrasiyası hesablanmışdır.

- Aerozol tədqiqatlarında atmosferə təsir edən əsas amillərdən biri də aerozolların hündürlük üzrə paylanması xüsusiyyətidir. Müəyyən edilib ki, sənaye mərkəzlərində aerozolların hündürlüyü görə paylanması onun ölçülərindən və çirkənmə mənbəyinin xüsusiyyətindən asılı olaraq formalasdır. Hündürlüyü görə paylanan aerozolun konsentrasiyasının dəyişməsi elektromaqnit dalğalarının aerozol hissəciklərindən udulması və səpələnməsi ilə izah olunur.

## REFERENCES

1. Uzhegov V.N., Phalagov Yu.A., Kabanov D.M., Sakerin S.M. Grubodispersnyj aerozol' i ego rol' v formirovani vysoty odnorodnoj aerozol'noj atmosfery //“Optika atmosfery i okeana”, tom 25, №12 (2012). s. 1023-1031. <http://web.iao.ru> > content > vol.25-2012 > iss (in Russia)
2. Abakumova G.M., Gorbarenko E.V. Prozrachnost' atmosfery v Moskve za poslednie 50 let i ee izmeneniya na territorii Rossii. M., 2008, s.109- 114. <https://urss.ru> > cgi-bin > db.pl (in Russia)
3. Poddubnyj V.A., Luzheskaya A.P. i dr. Ocenna vliyaniya goroda na aerozol'noe zamutnenie atmosfery po dannym dvuhtochechnyh izmerenij «Fon-promyshlennyj gorod». // Optika atmosfery i okeana. 2012. T25, №4. s.319-326. <http://www.anl.az> (in Russia)
4. Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V. Osnovy teoreticheskoy atmosfernoj optiki. Sankt- Peterburg. 2007. 73-83. <http://www.rrc.phys.spbu.ru> (in Russia)
5. Earth DATA, Giovanni The Bridge Between Data and Science v 4.34 URL: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Giovanni> (2020, 25 iyun)
6. AErosol RObotic NETwork) project URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>. (2020, 25 iyun)
7. Qlobal etraf mühit problemləri, ETSN. URL: <http://eco.gov.az/az/ekoloji-siyaset/qlobale-etraf-muhit-problemleri> (2020, 25 iyun)

Redaksiyaya daxil olub:

13.08.2020

Tamamlama işlərindən sonra:

12.06.2021

Nəşrə qəbul edilib:

17.06.2021

# **The Mineral Composition and Textural-Structural Peculiarities of the Ore, and Mineral Formation Stage of the Gedabek Gold-Copper Deposit (Lesser Caucasus)**

**G.S. Guseynov**

*Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)*

**For correspondence:**

Guseynov Gamed / e-mail: huseynov.qamet@asoiu.edu.az

**Abstract**

The mineral composition and textural and structural characteristics of ores are studied, also the phases and stages of mineralization, which are an important source of information on the conditions of formation of the deposit, time allocation of gold and its spatial association with certain mineral assemblages and associations. Consideration of these issues can come to an understanding of the factors behind the differences in the scale and extent of gold deposits of various types, as well as to form a mineralogical search features gold-bearing mineralization.

**Keywords:** mineral composition, textural, structural, gold, guns.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_121\_130

**For citation:**

*Guseynov G.S.*

[The Mineral Composition and Textural-Structural Peculiarities of the Ore, and Mineral Formation Stage of the Gedabek Gold-Copper Deposit (Lesser Caucasus)]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, Vol. 13, № 2. Pp. 121 – 130 (in English).

## Gədəbəy qızıl-mis-kolçedan yatağının mineral əmələgəlmə etapı və filizin tekstur-struktur xüsusiyyətləri (Kiçik Qafqaz) metodlarının analizi

**Q. S. Hüseynov**

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

### **Yazışma üçün:**

Hüseynov Qamet / e-mail: huseynov.qamet@asoiu.edu.az

### **Annotations**

Filizlərin mineral tərkibi, tekstur və struktur xüsusiyyətləri, həmçinin yatağın əmələ gəlməsi, qızılın vaxt bölgüsü və müəyyən mineral birləşmələri ilə məkan birləşməsi şərtləri haqqında mühüm məlumat mənbəyi olan minerallaşma mərhələləri öyrənilir. Bu məsələlərin nəzərdən keçirilməsi, müxtəlif növ qızıl yataqlarının öyrənilməsinə və axtarış amillərinin hazırlanmasına səbəb ola bilər.

**Açar sözlər:** mineral tərkibi, teksturası, quruluşu, qızıl, filiz.

**DOI:** 10.52171/2076-0515\_2021\_13\_02\_121\_130

---

УДК: 553.8.441

## **Минеральный состав и текстурно-структурные особенности руды, этапы минералообразования Гедабекского золотомедного месторождения (Малый Кавказ)**

**Г.С. Гусейнов**

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

### **Для переписки:**

Гусейнов Гамет / e-mail: huseynov.qamet@asoiu.edu.az

### **Аннотация**

Изучены минеральный состав и текстурно-структурные характеристики руд, а также стадии минералообразования, которые являются важным источником информации об условиях формирования месторождения, временном распределении золота и его пространственной ассоциации с определенными минеральными ассоциациями. Рассмотрение этих вопросов может привести к пониманию факторов, лежащих в основе различий в масштабах и протяженности месторождений золота различных типов, а также к формированию минералогических поисковых признаков золотоносного оруднения.

**Ключевые слова:** минеральная композиция, текстурная, структурная, золото, оруднение.

## Introduction

Gedabek gold-copper deposit located in the Azerbaijan part of the Lok-Karabakh suture zone. Gedabek gold-copper pyrite deposit was discovered in the first quarter of the 19th century, and due to the uniqueness of the geological structure and the high content of minerals, including precious metals (Au, Ag), for more than one and a half centuries has attracted the attention of many researchers and practitioners. Development of the field began in 1864 by the German concession Siemens brothers and lasted until the end of 1917. During this period, was produced 1,720 thousand tons of ore from which copper smelted about 58,047.5 m and simultaneously removed more than 3 tons of gold and 57 tons of silver.

Since 1917 in the field exploration conducted intermittently until 1989. From 1989 to 1997 research works were carried out by of the SCGSRI. In 1997, he signed a contract with the American company "RV Investment Group Servises LLC" and on the basis of this contract from 2009 to the present field is operated.

**Geology.** Gedabek deposit is located within the Shamkir raise Locke Agdam metallogenic zones of the Lesser Caucasus. The geological structure of the deposit involves deposition Middle and Upper Jurassic. Middle Jurassic volcanic rocks represented by the lower and upper Bajocian, Bathonian and Callovian. Volcanics of the Lower Bajocian-basalt, andesite and tuff, in the halo of the same name intrusion homfelsed intensively. Upper Bajocian presented by rhyolites, which cover the deposits of the lower Bajocian-rhyolites, hydrothermal quartzite. Breed Bathonian Stage transgressivly overlap the thickness of rhyolite and stacked basalt, andesite and partly their

tuffs and tuffs breccias. In turn overlap sedimentary-tuffaceous and carbonate sediments of Callovian-Oxfordian stages (fig.1).

**Work methods.** Mineral composition of the ore is set in a result of field documentation, microscopic study of polished sections, interpreting the chemical analytical data. For the minerals diagnosis used the of X-rays, measurements sectors of reflection, and a laser and X-ray microanalyses.

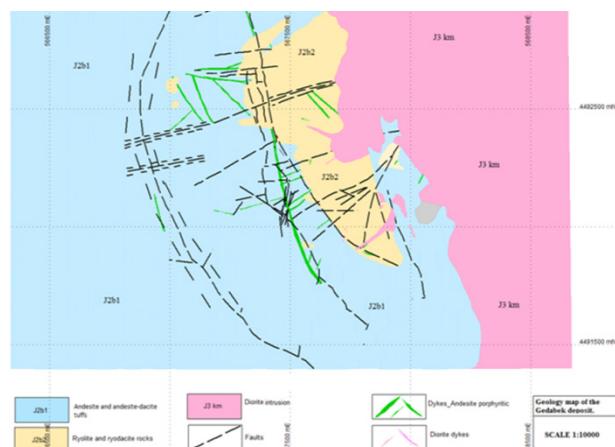


Figure 1. Geology map of the Gedabek deposit

**The solution of the problem.** The ore mineralogical composition of the Gedabek field at different times were studied by several researchers (Efendiyyev, 1957 Kerimov, 1963 Süleymanov 1982, Guseynov, 1989). Results sets, that in this field the main ore-forming minerals are pyrite, chalcopyrite, sphalerite, minor - galena, molybdenite, bomite, rutile, native gold, native silver, of vein-quartz, calcite, barite, of supergene-hydroxides, chalcocite, covellite, malachite, azurite, cuprite, native copper.

In connection with the start of mining activities in this field, there is a need for a detailed study of the mineral composition. To this end, field documentation of open workings microscopic study of polished sections, the interpretation of chemical analytical data. Minerals used for the diagnosis of X-ray and

laser microanalysis. As a result of these studies, in addition to previously established for the first time we have found some new minerals for Gedabek field [4] (Table 1).

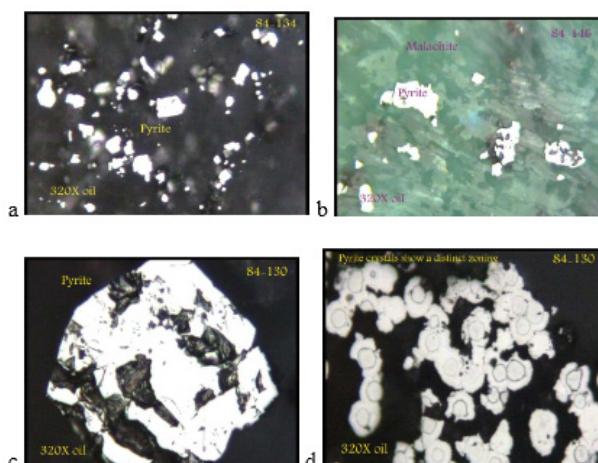
**Table 1.** List of minerals, ores diagnosed Gedabek field

The extent of	Hypogene		supergene
	Ore	nonmetallic	
The main	pyrite, chalcopyrite, sphalerite,	quartz, barite	
secondary	arsenopyrite, pyrrhotite, galena, tetrahedrite, Mushketov, magnetite, hematite, magmetit * Waller Minne *, cubanite, molybdenite *, marcasite, pentlandite, bravoite, bomite, Linnaeus *, rutile, native gold, native silver	calcite, sericite, chlorite, heulandite *	hydroxyls, iron, chalcocite, covellite, malachite, azurite, cuprite native copper

\* - Minerals first discovered by the authors

The main sulfide minerals characterized as follows:

**Pyrite.** Quantitatively dominant ore mineral, common in massive and disseminated ores, as well as near-ore metasomatic. He is represented by two generations (pyrite-I, pyrite-II). Pyrite I forms embedded in sericitized and silicified rocks, and characterized by a high degree of idiomorphism. Also found in malachit. (Fig. 2a, b).

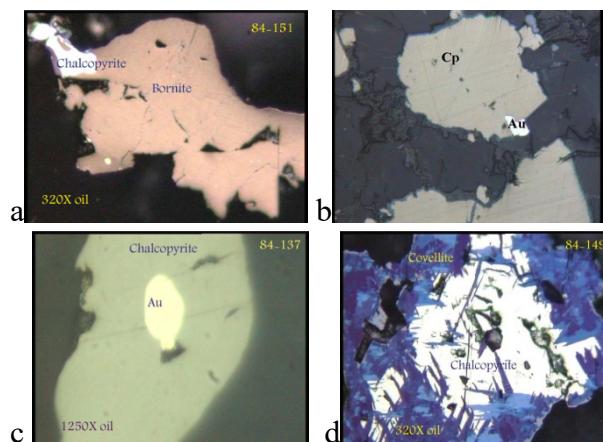


**Figure 2.** Varieties of pyrite aggregates

In massive pyrite ores forms continuous granular aggregates (Fig.2c). Etching it in crystals revealed concentric-zonal structure (Fig.2 d). Pyrite II in the form of single

crystals and isometric rozetchaty aggregates found in chalcopyrite. This generation is viewed as a product sulphidation chalcopyrite, apparently formed by metasomatic. Microscopic visible dissolving gold in pyrite II were detected. Perhaps the presence of fine gold.

**Chalcopyrite.** The average content of chalcopyrite ores pyrite-chalcopyrite-sphalerite type is about 0,2%, but in some areas can be observed prevalence of chalcopyrite and grouting them euhedral crystals and scattered grains of pyrite II. Yet bowl chalcopyrite is subordinate to fill the interstices between pyrite crystals, replacing them with the periphery, getting them to cracks. Closely associated with chalcopyrite ore tetrahedrite and sphalerite also bomite, covellite (Fig. 3a). Covellite observed as fringes, on the periphery of the developing chalcopyrite grains (Fig. 3b). Unlike pyrite II, in chalcopyrite appears visible gold. This is probably due to the redeposition of gold in the formation of the second stage of ore deposition. Microscopically visible isolation of native gold are presented in Figure 3 c, d.

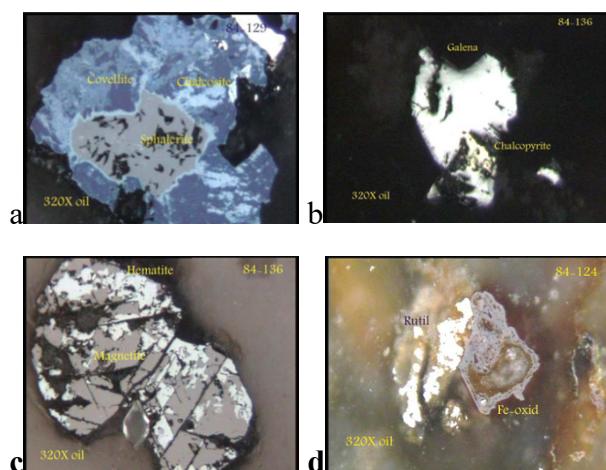


**Figure 3.** Variety of aggregates of chalcopyrite

**Sphalerite.** Enjoy wide spread distribution, although the average mineral content does not exceed a percent and only in some local areas reaches 2- 5%. Sphalerite

usually develops in the interstices of pyrite crystal sand quartz II as xeromorphic selections. Always contain coarse sphalerite disseminated chalcopyrite. Allocation chalcopyrite dominantsiz e3.0 microns distributed unevenly sphalerite matrix, forming a cloud clusters near cracks and twin joints that act as diffusion flows. Peripherals sphalerite grains free of chalcopyrite inclusions, but the latter forms Kai 10-20 microns thick around the grains of sphalerite. All this allows us to assume that, chalcopyrite in sphalerite is the product of the loss of high-solid solution. Is often intergrown with covellite and chalcocite (Fig. 4a).

**Galena.** Galena is in great development in ore Gedabey field, but always quantitatively inferior to the other main sulphides. The content in the ores galena does not exceed 3-5%, and usually occurs in the form of isolated grains of irregular shape, filling the spaces between sphalerite and chalcopyrite, indicating a later his education in relation to the latter, is often associated with chalcopyrite (Fig. 4 b).



**Figure 4.** Variety of aggregates of a) sphalerite, b) galena, c) rutile and d) magnetite

**Bornite.** Bornite is distributed unevenly in the ore, forming in some cases, large clusters, cementing pyrite crystals and aggregates. The

regularly oriented lamellar of chalcopyrite and chalcopyriterims inclusions are characterized for bomite, which is presented as a selection product of the solid solution and point to the relatively high temperature of formation. Therefore, the primary nature bomite, along with the implication that there are signs of bomite chalcocite, who had a secondary origin, often associated with chalcopyrite (Fig. 3a).

**Native gold.** Visible gold in the Gadabay ore deposits found in chalcopyrite (Fig. 3, d). The thin dispersion gold founded pyrite and arsenopyrite by analytical studies. There is the insignificantly Native silver in this field. Not funded in polished section

**Rutile.** Rutile is a rare mineral in the ores of the deposit occurs as single small isometric grains, the size in hundredths or tenths of a millimeter. Associated with sulphides early pyrite mineralization. Rarely associated with iron hydroxides (Fig. 4c). Hydroxides as the main product of oxidation of sulphide ores are very common in the field. The formation of iron hydroxides occurred as a result of various implication iron minerals pyrite, chalcopyrite, hematite and magnetite (Fig. 4d) in oxidized conditions. **Chalcocite.** Chalcocite in small numbers in the ore deposit and are distributed only in the oxidation zone of copper pyrite ores, where it forms thin rims and pallets around the selection of chalcopyrite, bomite less, due to which it was formed. Often forms chart chalcocite and covellite intergrowths, which is closely associated.

**Covellite.** Covellite enjoys relatively more extensive development than chalcocite, but does not form large aggregates. The only exception is the northern flank Gedabek deposit, which have accumulated considerable congestion kovellin ore, consisting of pyrite kovellin mixed with chalcocite, cuprite and native copper. Covellite observed under the microscope in the form of fringes, stacks on chalcopyrite (Fig. 3 b).

**Malachite, azurite, cuprite.** These minerals are often associated with each other and form different rims, shells, sinter forms in sulfide ores, the oxidation of which they were formed.

**Native copper** is very common mineral in the ores of the deposit, but does not create large clusters, found in almost all openings, forming his characteristic dendrites irregular. The formation of copper, apparently results from the interaction of copper sulfate and iron.

It should be noted that the article focuses on the first found minerals that give the opportunity to supplement mineral composition.

**Maghemite** in their optical data between intermediate mineral hematite and magnetite, and first discovered by us in Gedabek field.

Usually associated with hematite and magnetite, sulphides of iron, cobalt, nickel, copper, lead and zinc.

Color of the mineral magnetite in the presence of blue - gray, in the presence of hematite and hydroxyls takes pink. Reflectivity maghemite significantly lower than that of magnetite, anisotropic, gives brown internal reflexes, develops magnetite all varieties. In contrast to the nature of hematite magnetite maghemite a replacement, it develops in the center predominantly magnetite grains (characterized by irregular grains), which are rare remnants of constant \* brownish magnetite.

**Linnaeus** first set us Gedabek ore deposit. It is associated with chalcopyrite, sphalerite, arsenopyrite, galena, quartz, calcite and supergene minerals. Forms irregular shape of a selected size from 0.011 to 0.2 mm.

Pinkish-white color, depending on the isomorphic impurities ranging from red to cream. Reflectivity is very close to chalcopyrite. The results of measurements of the reflection linneita shown in Table 2.

Linneit teetched HCL (1:1) here is its zonal structure. Micro hardness linneit a  $H_{Cp} = 535 \text{ kg/mm}^2$  at load  $P = 20-50 \text{ g}$  shared  $= 470 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$ ; linneit a chemical composition was determined by electronmicroprobe (Table) MS-46 "CAMECA" (weight%): Co-45, 0; 2,0; Fe-4, 0; Cu-7, 0,42.0.

**Table 2.** The results reflect the changes in the spectra(Rm,%) Linneit a of Gedabek deposit

Wavelength, $\alpha$ , nm	Sam.Г.200
440	57,3
460	56,1
480	55,0
500	53,0
520	50,0
540	47,0
560	46,0
580	45,0
600	44,2
620	46,1
640	46,0
660	45,5
680	47,0
700	47,1
720	45,5
740	44,7

**Note:** The measurements were performed on the "ПИОН" (portable pulsed nano second single block) in the laboratory by L.N.Vyalov MTEMPAH (Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences)

Molybdenite was first installed by us in Gedabek field. It is found in the form of small phenocrysts nest size 0,001-0.1mm, rarely up to 1.0 mm. Sometimes forms large radiating, scale selection, also in places meet its crystals like plate intergrown with pyrite.

In reflected light, white and off-white is highly reflective. Double reflection is very strong anisotropic. The reflection spectra of molybdenite are shown in Table 3.

**Table 3.** The results reflect changes impactors (Rm,%) Molybdenite from Gedabek deposit

Wavelength, $\lambda$ , nm	Sam.F.201
440	46,7
460	46,0
480	46,7
500	47,0
520	47,5
540	48,3
560	49,4
580	50,4
600	51,4
620	52,5
640	53,0
660	53,8
680	53,9
700	53,8
720	55,2
740	55,2
760	55,4
780	56,2
800	57,5
850	58,8
900	59,6
950	61,0
1000	52,4
1050	63,6
1100	64,6

**Note:** The measurements were performed on the "ПИОН" (portable pulsed nanosecond single block) by L.N.Vyalovin the laboratory HTEMPAH (Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences)

Microhardness of molybdenum  $H_p = 59 \pm 0,05$  kgf/mm<sup>2</sup>

The chemical composition of Gyzylbulag molybdenite deposit determined by microprobe - 46 "Sateka"

Spectral analysis of molybdenite shows a small amount of impurity following (in%): iron (0.01-1.0), copper (0.05-0.1), bismuth -0.1, titanium (0.002-0.005), magnesium (0,0001-0,07), barium -0.02).

**Heulandite** first installed by us in Gedabek field. It is a significant part of calcite veinlets presented translucent light-colored

tabular unit, composing near-bandage areas. Sometimes fills voids in rocks, forming a brush tabular crystals.

Indices of refraction for heulandite  $N_{pl} = 1,502\ 0,001$ ;  $N_{gl} = 1,493\ 0,001$ . optical data and forms crystals typical heulandite.

**Textural-structural peculiarities of ore.** Principle factors, causing to formation of different textural types and structural interrelations are: morphologic peculiarities of ore minerals, character of ore solutions and mineral covering cavities, interrelation of ore minerals and so on, alterations, which the minerals imposing at the result of post-hard tectonic processes. Distribution of textural types of minerals of Gedabek deposit in vertical sections conforms to the laws: upward successively replaced vein-disseminated ores, localized in secondary quartzite, massive copper-sulfur and disseminated ores in mono quartzite [3]. There are spot, brecciated, venous, disseminated, vein-disseminated cement texture. There are dominancy of disseminated and vein-disseminated texture in volume of ore deposit, characterizing with significant dominancy rock forming and vein minerals on sulfides. In relation sulfides among them are the types of pyrite, pyrite-chalcopyrite and pyrite-chalcopyrite-sphalerite ores.

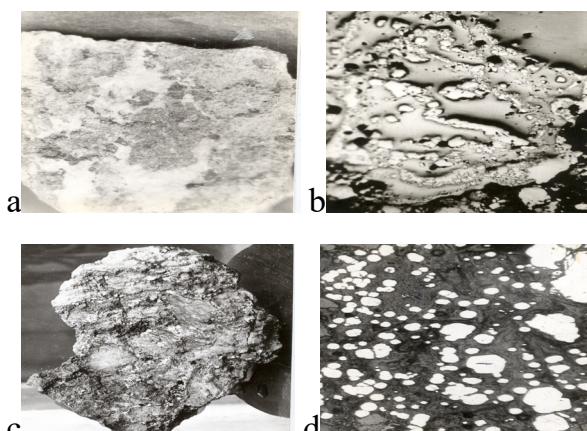
Phenocrysts presented by pyrite, chalcopyrite, sphalerite, sometimes galena. There are pyrite, pyrite-chalcopyrite composition with thickness to 5-8 mm in the transition zone, especially intensive apparent in expositive brecciate, characterizing of high transmissivity.

Spotty texture (fig 5.a) small-scale spreaded and developed only in area of contacts of ore bodies with lateral rocks. It forms by fine grain aggregates of pyrite developed in areola of secondary quartzites and quartz.

Vein texture refers to so-called non-homogenous texture and has gradual transitions to disseminated ores. This texture characterizes by timing spread of mineral

aggregates, constituent of vein and principle mass of ores. Such textural forms characterize for pyrite, frequently with composition of chalcopyrite. In this case lately formed pyrite vein cements with chalcopyrite (fig 5.b). Sometimes these veins have loop structure.

Brecciated texture has great similarity with loop structure according to external image. It has limited spreading at deposit and usually composes peripheral parts of ore bodies. It formed at the result of penetration of ore liquid with purely pyrite composition to secondary quartzites with disseminated pyritisation on net of cracks of possible directions (fig 5.c).



**Figure 5.** a) Spotted texture. Fine-grained pyrite aggregates in secondary quartzites. 90 x b) Vein texture. x 165, c) Brecciated texture. d) Interspersed texture. x 130.

Cement texture is peculiar for three mineral associations where ore forming minerals, in this case chalcopyrite and pyrite, cements fragments of intervening quartz rocks. It should be noted cementation of well-formed crystals of quartz with chalcopyrite, beside, latter dominates quantitatively on first.

Disseminated texture wide spreaded in the region and is peculiar for pyrite. Depending on scale of grain and density the disseminated texture presents significant diversity. It founds with direct contact with massive ore bodies and quartzites (fig 5.d). This texture forms

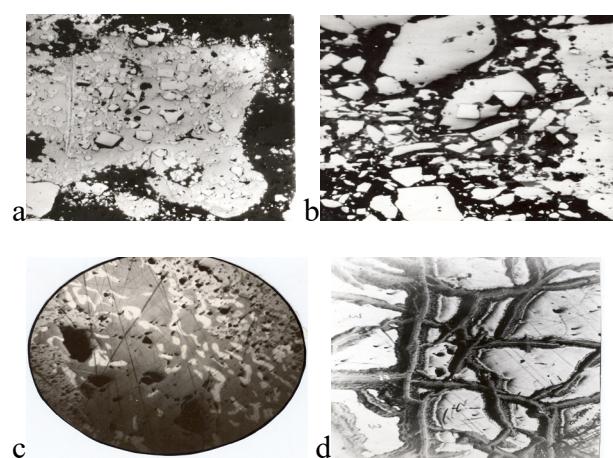
from chalcopyrite, sfaleryte in addition to pyrite.

There are spread structure, cellular and migrating-shell textures in hypergenesis zone of Gedabek deposit the characteristic feature of which is the development of concentrically zoned aggregates of oxides and hydroxides of iron and manganese, as well as complex combination of relict sulfides in cavities filled with secondary minerals.

Structural peculiarities of ores of Gedabek deposit differs with great differences [2].

There are initial structures, regarded directly to processes of ore deposition and secondary-formed at the result of fragmentation of ores and in zones of oxidation under effect of external aggregates.

Ores of deposits, characterizing mainly with grain structures, which are extremely different on their morphologic peculiarities (fig 6.a).



**Figure 6.** a) The granular structure formed pyrite grains in combination with chalcopyrite. 90 x b) Subgraphic structure. Accretion of bornite with galena. x 90, c) Cataclastic structure x90 d) Looped structure. Chalcopyrite is replaced by cracks hydroxides of iron. x 130.

Structure of destruction of hard liquid mainly wide development and found in ores of Gedabek deposit and more characteristically for chalcopyrite and shpalerite, where always

interventions of cubanite, valerite, sphalerite are found, in second turn chalcopyrite and pyrotine. Product of destruction of hard liquid is fire like allocation of pentlandite in pyrotine. Subgraphic structures (fig 6.b) arise at the result of destruction of hard liquid (decomposition faded ore with forming the oriented intergrowths of pyrite, sphalerite, arsenopyrite, chalcopyrite) and in zone of hypergenesis-legitimate accretion of bornite, chalcosine, coveline with chalcopyrite, sometimes with halenite. Structures of substitution observed in location of chalcopyrite, gray copper ore on early formed minerals, mainly in pyrite.

Cataclastic structures developed significantly less in complete ores in comparison with structures of deposits and substitution, but relatively it frequently stated near contacts of diabase, cutting sulfur ore bodies. Cataclastic structures are found mainly in zones of post ore fragmentation-on lines of tectonic violations (fig 6.c).

And different corrosion structures broadly developed, which in more intensity reached the edge side parts of ore rods in maximal copper - zinc ore development spaces.

Loop and concentric zonal structure are stated in described deposit (fig 6.d).

**Staged and phases of mineral forming ores.** Study of phasing of mineral forming allows determine dynamicity of formation of deposit, important genetic aspects and zone distribution of ore agent. As a reliable criteria for identifying the stages of mineralization are the intersection of the earliest communities of mineral veins and veinlets later stages of brecciation and previously deferred ore, accompanied by cementation of mineral masses of debris arising from more recent solutions [1].

The basis of allocation of mineral phases in the study focuses on: changes in the composition of mineral associations and

structural textural features of ores, featured intraoral metamorphism, accompanied by crushing, cementation, the intersection of the earliest associations later, temperature parameters. Character of presentation of metacrystals of ore and non-ore minerals is examined for proper interpretation of sequence.

Study of mineral composition and textural-structural parameters of the Gedabek deposit allows us to define in their formation two non-equal stages of mineralization: hypogenous and hypereogenous.

Hypogene mineralization stage is a long process, which established several stages of mineralization (quartz-pyrite, pyrite-sphalerite, quartz-carbonate) characterized by certain mineral assemblages and separated by tectonic shifts (intersection and cementation) and a relatively short intervals of time, during the change of the composition and concentration of the ore-bearing solutions.

Gold stated in quartz-pyrite ores in thin-disperse condition. Thin dissemination of gold is concentrated in early generation of pyrite.

Productive pyrite-chalcopyrite-sphalerite stage of mineralization, which widely developed directly under channel in type of stock-work deposited to early formed sulfuric-sulfur ores after period of inter stage fragmentation, schistosity and metamorphism of ores.

Process finishes with deposition of products of quartz -carbonate stage. They bear significant signs of deposited, lately character of mineralization. There is small-scale of gold.

During hypereogenous stage of mineralization formed secondary minerals at the expense of alteration of initial sulfides ores in zone of oxidation.

Thus, ores of described deposits formed during short period of geologic time and in this case stated zoning could not be conditioned with stratigraphic or other factors. It apparently regards with sum of acting reasons: 1) multiple

opening of cracks during migration of front in space; 2) staging coming of ore forming solutions, changing their composition on time on background of general reduction of temperature; 3) several diffuse penetration of ore forming agents.

Talking about role of ore-covering rocks in formation of zoning it should be noted that it arise in weakly expressed zoning in distribution of vein minerals around-ore- altered rocks relatively to parameters and so on, ore controlling fractures [4].

Staging of ore formation and sequence of secretion of minerals, stated in scheme.

The solution of the problem. The mineral composition and texture-structural features of the ores of the Gadabay deposit were established as a result of microscopic examination of polished sections, interpretation of chemical and analytical data. To diagnose minerals, X-ray diffraction, measurement of reflection sectors, X-ray spectral and laser microanalysis were used.

The study of the mineral composition and textural-structural features of the ores allowed us to determine the stages of ore formation and the sequence of minerals extraction in this deposit.

## Conclusions.

The results of the work on the mineral composition of ore deposits Gedabek concluded the following conclusions:

A microscopic study of the huge amount of polished sections and Interpretation chemical analytical data of the ore deposit was first discovered following minerals, maghemite, lynn, rinnna, molybdenite, heulandite.

Set the tune of separation of gold and its paragenetic relationship with certain minerals (pyrite, chalcopyrite).

The results of mineralogical and analytical studies have shown that the main carrier of gold in Gedabek field is the early pyrite. Gold in this mineral is thin dispersion condition. In chalcopyrite observed visible gold, which is probably related to the second stage of ore deposition.

Established structural-textural features of ores, which have scientific and practical importance in the study of the ore formation conditions of the Gedabek deposit.

The results have a great practical importance in the right choosing.

## REFERENCES

1. **Aliev M.I., Gusejnov G.S., Abbasov A.G.** Zolotonosnost stadij mineraloobrazovaniya Goshinskogo mestorozhdeniya (Malyj Kavkaz) //Vestnik Azerbajdzhan skoj inzhenernoj akademii. Tom 10, № 4, s. 98-102.
2. **Veliev G.A., Gusejnov G.S., Ahmedov A.M.** Veshchestvennyj sostav i teksturno-strukturnye osobennosti rud Gedabekskogo mestorozhdeniya (Malyj Kavkaz // zhurnal "Bilgi". Ser. geol., fiziko-matematicheskikh nauk. Baku, 2001, №4, s.85-92.
3. **Gusejnov G.S.** Zolotonosnost medno-kolchedannih mestorozhdenij Somhito- Karabahskoj strukturno-formacionnoj zony Malogo Kavkaza. Avtoreferat. Baku, 1989, 40 c.
4. **Gusejnov G.S., Mobili R.B.** Zolotonosnost kolchedannih mestorozhdenij Loksko-Agdamskoj metallogenicheskoj zony Malogo Kavkaza. – Baku: "Zardabi TTD", 2010, 286 s.

Received: 20.11.2020  
Revised: 17.06.2021  
Accepted: 21.06.2021

## MƏQALƏLƏRİN TƏRTİBATI QAYDALARI

Jurnalın redaksiya heyəti jurnalın elmi istiqamətinə uyğun gələn, heç bir yerdə nəşr olunmayan, digər jurnallara verilməyən məqalələrin elyazmalarına baxır.

Hazır məqalə redaksiyaya, [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com) elektron ünvanına göndəriləmlidir.

Məqalə azərbaycan, ingilis və ya rus dillərində yazılı bilər və aşağıdakılardı özündə eks etdirməlidir:

1. Məqalənin adı, müəlliflərin A.A. Soyadı, hər bir müəllifin çəhəndə müəssisənin adı və ünvanı (bütün məlumatlar hər üç dildə);

2. Müəlliflərdən birinin E-maili;

3. UOT kodu;

4. Annotasiya, 1000 simvol (3 dildə tərcüməsi);

5. Ağar sözlər, 6 sözdən çox olmayıraq (3 dildə tərcüməsi);

6. *Giriş, İşin məqsədi, Məsələnin qoyuluğu, Məsələnin həlli, Nəticə* bölmələri ilə məqalənin mətni;

7. A) İstifadə olunmuş mənbələrin siyahısı (15-dən çox olmayıraq), mənbə haqqında tam məlumat, həmçinin "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri" jurnalına istinad göstərilmək. Siyahi təsadüfi yolla deyil, mərndəki istinadların sırasına əsasən (1, 2, 3 ...) tərtib olunur. B) Bu siyahının latin dilində transliterasiya edilmiş mətni.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Редколлегия журнала рассматривает статьи, которые соответствуют научному профилю журнала, нигде не опубликованы и не переданы в редакции других журналов.

Готовую статью следует направить в редакцию на E-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com).

Статья может быть написана на азербайджанском, английском или русском языке и должна включать в себя:

1. Название статьи, И.О.Ф. авторов, наименования организаций каждого автора и адреса организаций (всё с переводом на три языка);

2. E-mail одного из авторов для переписки;

3. Код УДК;

4. Аннотацию, около 1000 символов (с переводом на три языка);

5. Ключевые слова, до 6 слов (с переводом на три языка);

6. Текст статьи с разбивкой на Введение, Цель работы, Постановка задачи, Решение задачи, Заключение;

7. Транслитерированный на латинице список использованных источников (не более 15) с указанием полных библиографических данных об источнике, в том числе ссылка на наш журнал «Вестник Азербайджанской Инженерной Академии». Список составляется в порядке указания ссылок в тексте (1, 2, 3...), а не вразброс.

## ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES

The editorial board of the journal reviews articles that correspond to the scientific profile of the journal, have not been published anywhere and have not been submitted to the editors of other journals.

The finished article should be sent to the editorial office by E-mail: [amaxeber@yahoo.com](mailto:amaxeber@yahoo.com)

The article can be written in any of three languages: Azerbaijani, English or Russian; 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 (all translated into three languages).

2. E-mail of one of the authors.

3. Universal Decimal Classification code, also known as UDC or УДК.

4. Annotation, about 1000 characters (with translation into three languages).

5. Key words, up to 6 words (with translation into three languages).

6. The text of the article with a breakdown into *Introduction, Purpose of work, Problem statement, Problem solution, Conclusion*.

7. a) A list of used sources (no more than 15) with full bibliographic data on the source, including a link to our 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; b) The transliterated text of this list in the Latin alphabet.

8. Şəkil və cədvəllerin məqalənin yazıldığı dildə adları (həmçinin, onların ingilis dilinə tərcüməsi). Şəkil və cədvəller birbaşa məqalənin mətnində onlara istinadların yanında yerləşdirilməlidir.

Redaksiyaya daxil olmuş məqalələr plagiat yoxlama prosedurundan keçir. Orijinallıq indeksi azı 75% olmalıdır.

Məqalələr redaksiya heyəti tərəfindən təyin olunmuş elmlər doktorları və ya namizədləri ray verir. Məqalələrə ray vermək üçün redaksiya heyəti və şurası üzvləri, eləcə də aparıcı mütəxəssisler cəlb edilir. Rəyin verilmə müddəti 3 aya qədərdir. Məqaləyə mənfi ray verildiyi halda redaksiya bu barədə müəllifə məlumat verir. Müəlliflərin təkrar düzəlişlərindən sonra məqalə yenidən rəyçilərə göndərilir, sonra isə rəyçinin son rayına əsasən redaksiya heyəti məqaləni nəşr üçün təsdiqləyir və ya imtina edir. Redaksiya mətni redakte etmək hüququna malikdir.

Mətnin yenidən yiğilması zamanı yaranı biləcək nöqsanları aradan qaldırmaq məqsədi ilə məqalə mətni Word for Windows formatında, Times New Roman şrifti ilə elektron şəklində də redaksiyaya təqdim edilməlidir.

Əlyazmanın nəşri üçün müəlliflərdən ödəniş alınmır.

8. Названия рисунков и таблиц на языке написания статьи (plus их перевод на английский язык). Рисунки и таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи рядом с обязательными ссылками на них.

Поступившие в редакцию рукописи проходят процедуру проверки на plagiat. Индекс оригинальности должен составлять не менее 75%.

Статьи рецензируются докторами или 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 связывается 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.

Плата с авторов за публикацию рукописи не взымается.

## ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES

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.

No fee is charged from the authors for the publication of the manuscript.

**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 13. № 2  
Vol. 13. № 2  
Том 13. № 2

**BAKİ – 2021**

İnformasiya şöbəsinin müdürü  
**Nailə Əskərova**

Nəşriyyat və yayım şöbəsinin müdürü  
**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 imzalanmış 25.06.2021,  
formatı 60x84 1/8,  
kağız ofset, f.q.v. 16.5  
Tirajı 1105 əd.*