



**Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
XƏBƏRLƏRİ**

Beynəlxalq elmi-texniki jurnal

**HERALD
of the Azerbaijan Engineering Academy**

The international science-technical journal

**ВЕСТНИК
Азербайджанской Инженерной Академии**

Международный научно-технический журнал

Cild 14. № 2
Vol. 14. № 2
Том 14. № 2

BAKİ – 2022

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

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

REDAKSİYA HEYƏTİ:

akademik Ə.M. Abbasov, akademik R.İ. Abdullayev, akademik H.S. Bağırov,
akademik N.H. Cavadov, akademik B.H. Əliyev, akademik C.C. Əsgərov,
professor A.Y. Qriqoryev (*Belarus*), akademik A.Z. Quliyev, akademik B.V. Qusev (*Rusiya*),
akademik H.Ə. Məmmədov, akademik G.H. Məmmədova, akademik H.F. Mirələmov,
akademik S.Y. Müslümov, akademik 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. Dövriyyi ilda 4 dəfədir.

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyində qeydiyyata alınmışdır.

Qeydiyyat № 2965, 23.06.2009-cu il.

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

Jurnal "Rusiyannın 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 Identifikatoru) verilir.

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

Jurnal «Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0» Beynəlxalq lisensiya 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".

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

Redaksiyanın invanı:

Puşkin küçəsi 30, 3-cü mərtəbə,,
Bakı ş. AZ1010,
Azərbaycan Respublikası
Tel/Faks: (+99412) 598 24 52
E-mail: amaxeber@yahoo.com
<http://ama.com.az>

FOUNDER: Public union

"Azerbaijan Engineering Academy"

Journal published since November, 2009.

Issued 4 times a year.

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

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

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

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

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

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

Journal licensed under Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0.

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

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

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

Address of editorial offices:

Pushkin str., 30, 3 floor,
Baku, AZ 1010,
Azerbaijan Republic
Tel/Fax: (+99412) 598 24 52
E-mail: amaxeber@yahoo.com
<http://ama.com.az>

УЧРЕДИТЕЛЬ: Общественное объединение «Азербайджанская Инженерная Академия».

Журнал издается с ноября 2009 года.

Периодичность: 4 раза в год.
Зарегистрирован Министерством Юстиции Азербайджанской Республики.

№ регистрации: 2965 от 23.06.2009 г.

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается Цифровой Идентификатор Объекта DOI.

Журнал размещен в Международных базах научного цитирования International Scientific Indexing (ISI) и Scientific Journal Impact Factor (SJIF), выданы СЕРТИФИКАТЫ, импакт фактор ISI – 1.327 и импакт фактор SJIF – 8.434.

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

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

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

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

Адрес редакции:

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



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

© Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası, 2022
© Azerbayan Engineering Academy, 2022
© Азербайджанская Инженерная Академия, 2022

M Ü N D Ö R İ C A T

A v i a s i y a

Kərimli T.İ.

Hava siqnalları sistemi ilə uçuş aparatlarının fəza vəziyyəti və istiqamətinin ölçülməsi 7

Sadixov İ.Z.

Müxtəlif zonalarda çıxarılan neftlərin flüoresensiya spektrlərinin ölçülməsi məqsədi ilə KA-14 LİDAR-ının kalibrovka edilməsi 15

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

Canəhmədov Ə.X., Volçenko D.A., Volçenko N.A., Skripnik V.S., Juravlev D.Y., Malik L.B.

Triboqovşaqlarda xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikası (I hissə) 20

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

Krasin P.S., Yevçenko A.S.

Öyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodları (II hissə) 31

Qurbanov Ə.N., Sərdarova İ.Z., Əliyeva L.A.

Fırlanma üzlərinin hesablanmasında son elementlərin tətbiqi üsulu 48

Yusubov F.F.

Friksion kompozitlərdə mikrotəbəqələşmənin SEM vasitəsilə tədqiqi və yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsi 55

Volçenko D.A., Mirələmov H.F., Skripnik V.S., Volçenko N.A., Juravlev D.Y.

Öyləc qurğularının enerji yüklənməsində sürtünmə cütü mikroçixıntılarının kontakt ləkələrinin rolu 64

N e f t və q a z

İsmayılov Q.Q., Şahlarlı M.E., İsmayılov Ş.Z.

Multifazalı sualtı boru kəmərlərinin istismar səmərəliliyinin artırılmasının bəzi məsələləri 74

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

Məmmədova S.R.

Sm və Gd (III) tereftal turşusu ilə supramolekulyar birləşmələrinin sintezi və fiziki-kimyəvi tədqiqi 81

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.

GPS-siqnalların cəm gecikməsinin zaman dəyişməsinin proqnozu məsələsi 89

C i h a z q a y i r m a

Abdullayev A.A.

Tətbiqi proqramlar əsasında konvertoplan tipli pilotsuz uçuş aparatının planerinin kompüter modelləşdirilməsi 95

K ə n d t ə s ə r r ü f a tı

Bədəlova A.N., Quliyeva S.H.

Kənd təsərrüfatı bitkilerinin təsnifatlandırılması və qiymətləndirilməsi üçün maşın öyrənmə üsullarının tətbiqi 106

E k o l o g i y a

Əzizov B.M., Mehdiyev C.S., Məmmədov H.N., Guliyeva S.H.

Yerüstü obyektlərin şüalanma xarakteristikalarının hesablanmasına riyazi modelləşdirməsi 117

Kərimova G.X.

Daşkəsən dağ-mədən sənayesi tullantılarının riyazi qiymətləndirilməsi 124

C O N T E N T S

A v i a t i o n

Karimli T.I.

Measurement by air data system of spatial position and direction of aircraft 7

Sadikhov I.Z.

Calibration of KA-14 LIDAR to measure the fluorescence spectra of oils extracted in various zones 15

M e c h a n i c s a n d M e c h a n i c a l E n g i n e e r i n g

Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A., Skrypnyk V.S.,

Zhuravlev D.Yu., Malyk L.B.

Non-equilibrium thermodynamics with linear modes in tribo-couplings (Part I)..... 20

Zhuravlev D.Yu., Javadov M.Y., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Krasin P.S., Evchenko A.S.

Physical methods for assessing the load of friction pairs of braking devices (Part II) 31

Gurbanov A.N., Sardarova I.Z., Aliyeva L.A.

Application of the finite element method in the calculation of shells of revolution 48

Yusubov F.F.

SEM investigation of microlayer formation and study of wear mechanism in friction composites 55

Volchenko D.A., Miralamov H.F. , Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Juravlev D.Y.

The role of contact spots of friction pairs of microprotrusions in the energy loading of braking devices 64

O i l a n d G a s

Ismayilov G.G., Shahlarli M.E., Ismayilov Sh.Z.

Some issues to increase the operational efficiency of multiphase flow of subsea pipelines 73

C h e m i c a l a n d C h e m i c a l T e c h n o l o g y

Mammadova S.R.

Synthesis and physico-chemical study of supramolecular compounds Sm and Gd (III)
with terephthalic acid 81

I n f o r m a t i o n T e c h n o l o g y

Eminov R.A.

Issues of time change forecasting of the total delay of GPS signals 89

I n s t r u m e n t a t i o n

Abdullayev A.A.

Computer simulation of a convertor-type UAV planer based on applied applications 95

A g r i c u l t u r e

Badalova A.N., Guliyeva S.H.

Application of machine learning methods for classification of agricultural crops 106

E c o l o g y

Azizov B.M., Mekhtiyev J.S., Mammadov H.N., Guliyeva S.H.

A mathematical model for accuracy improvement of determining the radiative
characteristics of objects on the Earth's surface 117

Karimova G.X.

Mathematical assessments Dashkesan mining industry waste 124

СОДЕРЖАНИЕ

Авиация

Каримли Т.И.

Измерение пространственного положения и направления полета летательных аппаратов системой воздушных сигналов 7

Садыхов И.З.

Калибровка LIDAR KA-14 с целью измерения спектров флуоресценции нефти, добываемой в различных зонах 15

Механика и машиностроение

Джанахмедов А.Х., Вольченко Д.А., Вольченко Н.А.,

Скрыпник В.С., Журавлев Д.Ю., Малык Л.Б.

Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжениях (часть I) 20

Журавлев Д.Ю., Джавадов М.Я., Скрыпник В.С., Вольченко Н.А.,

Красин П.С., Евченко А.С.

Физические методы оценки нагруженности пар трения тормозных устройств (часть II) 31

Гурбанов А.Н., Сардарова И.З., Алиева Л.А.

Применение метода конечных элементов при расчете оболочек вращения 48

Юсубов Ф.Ф.

Исследование формирования микрослоев с SEM и изучение механизмов износа во фрикционных композитах 55

Вольченко Д.А., Мираламов Г.Ф., Скрыпник В.С., Вольченко Н.А., Журавлев Д.Ю.

Роль пятен контактов микровыступов пар трения в энергонагруженности тормозных устройств 64

Нефть и газ

Исмаилов Г.Г., Шахларлы М.Э., Исмаилов Ш.З.

О повышении эксплуатационной эффективности многофазных потоков подводных трубопроводов 73

Химия и нефтехимические технологии

Мамедова С.Р.

Синтез и физико-химическое исследование супрамолекулярных соединений Sm и Gd (III) с терефталевой кислотой 81

Информационные технологии

Эминов Р.А.

Вопросы прогноза временного изменения суммарной задержки GPS-сигналов 89

Приборостроение

Абдуллаев А.А.

Компьютерное моделирование планера БПЛА конвертопланерного типа на основе применяемых прикладных программ 95

Сельское хозяйство

Бадалова А.Н., Кулиева С.Г.

Применение методов машинного обучения для классификации сельскохозяйственных культур 106

Экология

Азизов Б.М., Мехтиев Д.С., Мамедов Х.Н., Гулиева С.Х.

Математическое моделирование для учета радиационных характеристик наземных объектов 117

Каримова Г.Х.

Математические оценки отходов горнодобывающей промышленности Дашкесана 124

Measurement by Air Data System of Spatial Position and Direction of Aircraft

T.I. Karimli

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

For correspondence:

Karimli Togrul / e-mail: tkarimli@mail.ru

Abstract

The article gives a review of air data system, the perspectives for expanding the improvement of its functional capability are determined. The conditions for increasing the technical capabilities of smart air signal systems, produced on the basis of advanced technology used on the 5th generation US military aircraft and civil aircraft, have been determined. The installation of additional air pressure receivers on smart air signal systems, along with the measured altitude and speed parameters, presents the possibilities and algorithms for measuring the angles of roll, pitch, yaw and lateral speed of aircraft, which are the necessary primary flight parameters.

Keywords: aircraft, air data system, total and static air pressure, smart probes, vane, angle of attack, attitude, yaw angle.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_7_14

Received 29.11.2021
Revised 14.06.2022
Accepted 20.06.2022

For citation:

Karimli T.I.

[Measurement by air data system of spatial position and direction of aircraft]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 7-14 (in Azerbaijani)

Hava siqnalları sistemi ilə uçuş aparatlarının fəza vəziyyəti və istiqamətinin ölçülməsi

T.İ. Karimli

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

Yazışma üçün:

Karimli Toğrul / e-mail: tkarimli@mail.ru

Xülasə

Məqalədə mövcud hava siqnalları sistemlərinin təhlili aparılmış, onun funksional imkanlarının genişləndirilməsi perspektivləri müəyyən edilmişdir. Qabaqcıl texnologiya əsasında yerinə yetirilən, 5-ci nəsil ABŞ hərbi təyyarələrində, sərnişin hava gəmilərində tətbiq edilən smart hava siqnalları sisteminin texniki göstəricilərinin artırılması üçün şərait müəyyən edilmişdir. Smart hava siqnalları sistemində əlavə təzyiq vericilərinin quraşdırılması ilə, ölçülən hündürlük-sürət parametrləri ilə yanaşı, əlavə olaraq, zəruri pilotaj parametrlər kimi hesab edilən hava gəmisinin kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarının və yan sürətinin ölçülməsinin mümkünlüyü və alqoritmləri verilmişdir.

Açar sözlər: hava gəmisi, hava siqnalları sistemi, tam və statik hava təzyiqləri, smart təzyiq qəbuləcəkləri, hücum bucağı, fəza vəziyyəti, vurnuxma bucağı.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_7_14

УДК: 629.7.05

Измерение пространственного положения и направления полета летательных аппаратов системой воздушных сигналов

Т.И. Каримли

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

Для переписки:

Каримли Тогрул / e-mail: tkarimli@mail.ru

Аннотация

В статье проводится обзор системы воздушных сигналов, определены перспективы совершенствования ее функциональных возможностей. Определены условия увеличения технических возможностей смарт-систем воздушных сигналов, производимых на основе передовых технологий, применяемых на военных самолетах США 5-го поколения и гражданских воздушных судах. Установлением дополнительных приемников воздушных давлений на смарт-системах воздушных сигналов, наряду с измеряемыми высотно-скоростными параметрами, представлены возможности и алгоритмы измерений углов крена, тангажа, рыскания и боковой скорости воздушных судов, являющиеся необходимыми пилотажными параметрами.

Ключевые слова: воздушное судно, система воздушных сигналов, полное и статическое воздушное давление, смарт-приемники давлений, угол атаки, пространственное положение, угол рыскания.

Giriş

Hava gəmilərinin (HG) idarəedilməsi və naviqasiyası məsələlərinin həlli zamanı uçuş hündürlüyü, üfüqi və şaquli sürətləri ölçən informasiya mənbəyi kimi, bir qayda olaraq, aerometrik ölçmə metoduna əsaslanan hava siqnalları sistemindən (HSS) istifadə edilir [1].

Müasir HG-də rəqəmsal HSS tətbiq edilməsi naviqasiya, avtomatik idarəetmə və uçuş rejimlərinin optimallaşdırılması ilə əlaqədar olan mürəkkəb məsələlərin daha dəqiq həllinə imkan verir. Əgər HG uçuşun təhlükəli hündürlük-sürət parametrlərinə yaxınlaşarsa, HSS müvafiq işiq və səs siqnalizasiya siqnallarını hasil edir.

Aerometrik metoda əsaslanan HSS ilə, xüsusilə qitələrarası uçuşları yerinə yetirən HG-də əsas və ehtiyat informasiyalarının ölçülülməsinin etibarlığını atrırmak, metodik xətalari azaltmaq məqsədi ilə eyni bir informasiyaların bir neçə müxtəlif üsulla ölçülülməsi zəruridir. Bu zərurət peyk sistemlərində gələn siqnalların kəsilməsi nəticəsində özünü daha qabarlıq formada bürüzə verir.

Aerometrik üsuldan istifadə etməklə, təyyarələrin pilotaj xüsusiyyətini xarakterizə edən, bucaq parametrlərindən olan hücum bucağının və sürüşmənin ölçülülməsi qurğusu geniş istifadə edilir.

Hərəkətli flyugerdən, qızdırıcıdan, gövdədən və onun daxilində yerləşən ölçü sxemindən ibarət olan qurğuda hücum bucağından asılı olaraq, flyugerin bucaq yerdəyişməsi vericinin çıxışında elektrik siqnalına çevrilir. Qanada bənzər, fırlanma oxu ətrafında hərəkət edən, axınlanan simmetrik cisim olan flyuger hava axınında quraşdırılır.

Flyuger müəyyən vəziyyətdə aerodinamik momentlə qərarlaşır. Lakin qurğu bir sıra qüsurlara malikdir. Belə ki, flyugerin mexaniği hərəkəti nəticəsində yaranan sürtünmə qüvvəsi həssaslığın azalmasına və alət xətasının

artmasına səbəb olur, bununla yanaşı, qurğu yalnız hücum bucağını və sürüşməni ölçə bilir [2].

Aerometrik metoda əsaslanan, hava parametrləri sisteminə malik, Airbus, A340-500/600 [3], Boeing 747 [4] hava gəmilərində istifadə edilən dörd ədəd, Boeing 787-də [5] isə üç ədəd tam və altı ədəd statik təzyiq qəbuledicisindən, iki ədəd havanın tam temperatur vericisindən, qızdırıcılarla təchiz edilən iki ədəd flyugerli hücum bucağı vericilərindən isifadə edilir.

Təzyiq qəbuledicilərindən, temperatur və hücum bucağı vericisindən mənimşənilən verilənlər əsasında, hava parametrləri modulları və müvafiq hesablayıcılar hava parametrlərinin giriş siqnallarının daxil olmasının idarə edilməsi, hava parametrlərinin hesablanması, tam və statik təzyiq qəbuledicilərinin, havanın tam temperaturu və hücum bucağı vericilərinin qızdırılması, hava parametrləri sistemində olan nasazlıqların müəyyən edilməsi və bu barədə hesabatın hazırlanması yerinə yetirilir. Belə hava parametrləri sistemində aşağıdakı parametrlər müəyyən edilir: statik təzyiq, tam təzyiq, təsir təzyiqi, dinamik təzyiq, tam hava temperaturu, statik hava temperaturu, barometrik hündürlük, hündürlüğün dəyişmə sürəti, indikator hava sürəti, kalibrasiya edilmiş hava sürəti, həqiqi hava sürəti, maksimal istismar sürəti, Max ədədi və hücum bucağı.

Məsələnin aktuallığı

Mövcud sistemlə HG-nin kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarının və yan sürətinin ölçülməməsi digər ölçmə metoduna əsaslanan inersial naviqasiya sisteminin hesabına təmin edilir.

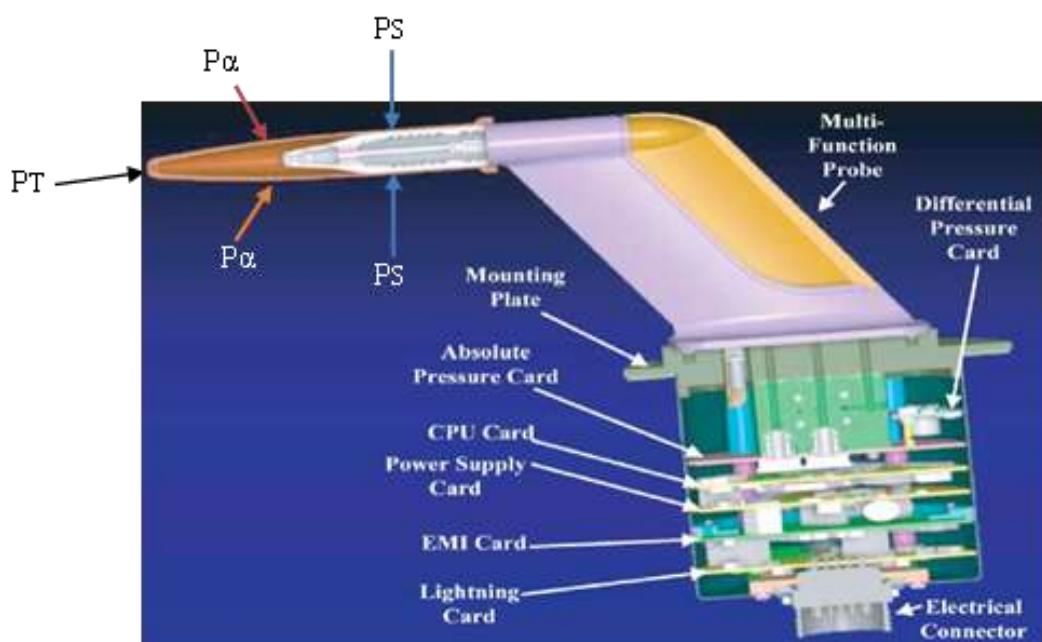
Belə ki, HG-nin kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarının təhlükəli həddinin aşması qəti yolverilməzdır [6].

Müasir Airbus A350, A380 və Embraer ERJ-170/190 HG-də, o cümlədən 5-ci nəsil ABŞ hərbi təyyarələrində qabaqcıl texnologiyalardan istifadəyə əsaslanan smart HSS tətbiq edilir [7].

Embraer ERJ-170/190 HG-də tətbiq edilən smart HSS digər təyyarələrdəki sistemdən fərqli olaraq, hücum bucağının flyugersiz ölçüməsi nəticəsində mexaniki sürtünmə istisna edilir, aşağı uçuş sürətlərində həssaslıq,

konstruksiyanın etibarlılığı və istismar müddəti artır, pnevmatik boru xətlərinin, təzyiq və hücum bucağı qəbuledicilərində buzlaşma əleyhinə qızdırıcıların sahəsi, kütlə qabarit göstəricilərin azaldılması baş verir, texniki xidmət asanlaşır, əməyin məhsuldarlığı artır [8].

Şəkil 1-də Smart HSS qəbuledicisinin sxemi verilmişdir.



Şəkil 1 – Smart HSS qəbuledicisi
Figure 1 – Air Data Smart Probe

Konus tipli boru şəklində olan təzyiq qəbuledicisində quraşdırılmış dəliklərdən tam təzyiq - P_T , statik təzyiq - P_S diferensial təzyiq - P_α daxil olur. Smart HSS vericisində hava siqnalları kompüterində korreksiya edilmiş statik təzyiq, korreksiya edilmiş tam təzyiq, təsir təzyiqi, dinamik təzyiq, tam hava temperaturu, statik hava temperaturu, barometrik korreksiya, barometrik hündürlük, korreksiya edilmiş barometrik hündürlük, hündürlüyün dəyişməsi, indikator hava sürəti, kalibrasiya edilmiş hava sürəti, həqiqi hava sürəti, maksimal istismar

sürəti, maksimal istismar Max ədədi və hücum bucağı kimi parametrlər müəyyən edilir [8].

Bir sıra parametrlərin ölçüməsinə və sistemin etibarlılığının və istismar müddətinin çox olmasına, texniki xidmətin sadəliyinə baxmayaraq, aerometrik metodla mövcud smart HSS ilə HG kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarının və yan sürətinin ölçüməsi mümkün deyil.

Aerometrik metodla, HSS ilə, xüsusilə, qitələrarası uçuşları yerinə yetirən HG-də əsas və ehtiyat informasiyaların ölçüməsinin etibarlılığını atrırmak, metodik xətaları azaltmaq məqsədilə eyni parametrlərin bir neçə müxtəlif

metodla ölçülməsi vacibdir. Bu zərurət peyk sistemlərindən gələn siqnalların kəsilməsi nəticəsində, yerüstü radiotexniki vasitələrin HG ilə əlaqəsinin mümkünzsizlüğündə (oceanların, qütblerin, çoxsaylı dağ silsilələrinin üzərindən uçarkən) özünü daha qabarlıq formada bürüzə verir, belə ki, HG-nin bucaq vəziyyətlərinin və naviqasiya parametrlərinin ölçülməsi, uçuşun avtomatik idarə edilməsi yalnız inersial naviqasiya sistemindən asılı olur.

Peyk, radiotexniki siqnalların olmadığı, ehtiyat informasiyanın çatışmazlığı ilə müşayiət edilən xüsusi şəraitlərdə uçuşları yerinə yetirərkən inersial naviqasiya sistemindən tam asılılığı aradan götürmək məqsədilə aerometrik metodun imkanlarını artırmağa imkan verən HG-nin bucaq parametrlərinin (kren, tanqaj, vurnuxma) və yan sürətinin ölçülməsinə şərait yaradan HSS işlənməsi qitələrarası uçuşları yerinə yetirən təyyarələr üçün aktual məsələlərdən biri hesab edilir [2, 9].

Qarşıya qoyulmuş məsələnin həlli zamanı hava siqnalları sistemi ilə HG-nin fəza vəziyyətinin (kren və tanqaj bucaqları), vurnuxmasının və yan sürətinin ölçülməsinin aerometrik metod və qurğusunun timsalında aşağıda qeyd edilən məqsəd nəzərdə tutulmuşdur:

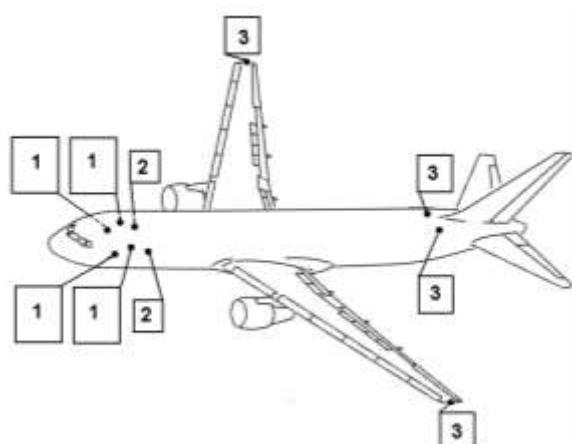
- təbii və texniki amillərdən asılı olan yerüstü radiostansiyalarından və peyk sistemindən gələn siqnalların kəsilməsi (xüsusi dağ silsiləleri, ocean və qütblerin üzərindən uçuşları yerinə yetirərkən) şəraitində uçuşları davam etdirərkən, əlavə olaraq mühüm pilotaj parametrlər kimi hesab edilən HG-nin kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarının və yan sürətinin ölçülməsi;

- informasiya etibarlılığının və uçuşların təhlükəsizliyinin artmasının təmin edilməsi [10, 11].

Məsələnin həlli

Şəkil 2-də təqdim edilən, hava gəmilərinin fəza vəziyyətinin, vurnuxmasının və yan sürətinin ölçülməsinin aerometrik metodla təyin edilməsinə şərait yaradan qəbuledicilərin HG-də yerləşmə yerlərinin sxemi göstərilir. HG-nin füzelyajının ön hissəsinin sol və sağ tərəflərində quraşdırılmış dörd dəst havanın təzyiq qəbuledicisindən 1 (tam təzyiq, diferensial təzyiq, statik təzyiq, yan statik təzyiq qəbulediciləri bir gövdədə cəmləşib) və 2 ədəd havanın tam temperatur vericisindən 2, qanadın sol və sağ tərəflərinin ucunda, həmçinin füzelyajın arxa hissəsinin sol və sağ tərəflərində quraşdırılmış 4 dəst havanın təzyiq (statik təzyiq, yan statik təzyiq qəbulediciləri bir gövdədə cəmləşib) qəbuledicisindən 3 və 4 ədəd hava parametrləri kompüterində (şəkildə göstərilməyib) ibarətdir [10, 11].

Hava parametrləri kompüteri hər bir təzyiq qəbuledicilərinin 1 dəstinə daxil olub, mənimşənilmiş təzyiqlərə mütənasib olaraq, sürət və hündürlük parametrləri ilə yanaşı, əlavə olaraq kren, tanqaj, vurnuxma bucaqlarını, həmçinin yan sürətin hesablanması və ölçülməsi əməliyyatlarını yerinə yetirir.

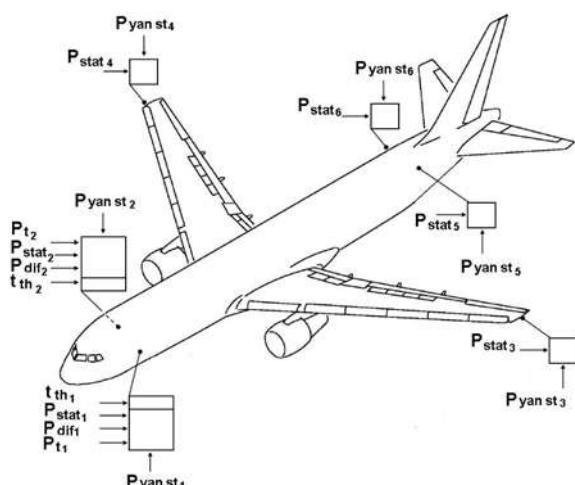


Şəkil 2 – HG-də əlavə quraşdırılan smart qəbuledicilərin yerləşmə sxemi

Figure 2 – Location scheme of additional Smart Probes installed in aircraft

Kren bucağı sol və sağ tərəf qanadlarının uclarında quraşdırılmış statik təzyiq qəbuledicilərindən 3 mənimsənilən təzyiqlər fərqindən, tanqaj bucağı hava gəmisinin ön 1 və arxa hissəsində quraşdırılmış 3 statik təzyiq qəbuledicilərindən mənimsənilən təzyiqlər fərqindən, vurnuxma bucağı və yan sürət ön sol və sağ tərəflərdə 1 və arxa hissədə quraşdırılmış 3 sol və sağ yan statik təzyiq qəbuledicilərindən mənimsənilən təzyiqlər fərqindən formalasır.

Əgər hava gəmisi küləyin təsiri ilə yan sürətə malik olarsa, onda ön sol və arxa sol hissədə quraşdırılan havanın yan statik təzyiq qəbuledicisindəki yan statik təzyiqlər fərqi ön sağ və arxa sağ hissədə quraşdırılan yan statik təzyiqlər qəbuledicisindəki yan statik təzyiqlər fərqi bir-birinə bərabərdirse, hava gəmisi yalnız yan sürətə görə fərqlənirsə, vurnuxma bucağına malikdir.



Şəkil 3 – HSS informasiya mənbələrinin yerləşmə sxemi

Figure 3 – Location scheme of Air Data System information sources

Şəkil 3-də HG-də smart qəbuledicilərdən mənimsənilən HSS informasiya mənbələrinin yerləşmə sxemi əsasında təklif edilən metoda əlavə olaraq kren, tanqaj, vurnuxma və yan sürət göstəricilərinin hava parametrləri kompü-

terlərində hesablanması alqoritmi aşağıda-kılardan ibarətdir:

1. Kren bucağı: $\gamma \sim P_{stat4} - P_{stat3}$ ilə müəyyən edilir. $\gamma < 0$ sol krenə (sol qanad aşağı), $\gamma > 0$ sağ krenə (sağ qanad aşağı) uyğundur. $P_{stat4} - P_{stat3} = 0$ olduqda, $\gamma = 0$ olur;
2. Tanqaj bucağı: $\vartheta \sim P_{stat5} - P_{stat1}$ və ya $\vartheta \sim P_{stat6} - P_{stat2}$ ilə müəyyən edilir. $\vartheta < 0$ şığima (burun aşağı), $\vartheta > 0$ yüksəlmə (burun yuxarı) vəziyyətlərinə uyğundur. $P_{stat5} - P_{stat1} = 0$ və ya $P_{stat6} - P_{stat2} = 0$ olduqda, $\vartheta = 0$ olur;
3. Vurnuxma bucağı: $\psi \sim (P_{yan\ stat5} - P_{yan\ stat1}) = (P_{yan\ stat2} - P_{yan\ stat6})$ ilə müəyyən edilir. $\psi < 0$ sola vurnuxma, $\psi > 0$ sağa vurnuxma vəziyyətlərinə uyğundur. $(P_{yan\ stat5} - P_{yan\ stat1}) = (P_{yan\ stat2} - P_{yan\ stat6}) = 0$ olduqda, $\psi = 0$ olur;

4. Yan sürəti:

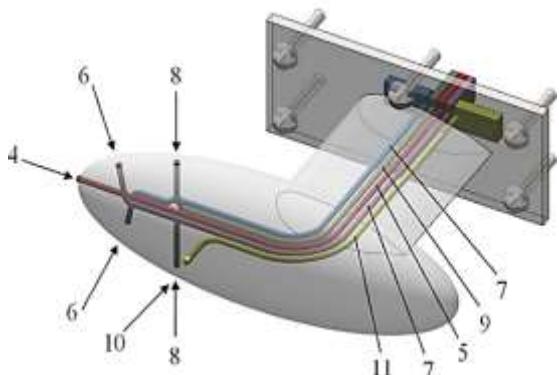
$$\begin{cases} v_{yan} \sim (P_{yan\ stat1} - P_{yan\ stat2}) = (P_{yan\ stat5} - P_{yan\ stat6}) \\ P_{yan\ stat1} = P_{yan\ stat3} = P_{yan\ stat5} \\ P_{yan\ stat2} = P_{yan\ stat4} = P_{yan\ stat6} \end{cases}$$

$v_{yan} > 0$ olduqda sağ tərəfə meyilli yan sürətə, $v_{yan} < 0$ sol tərəfə meyilli yan sürətə uyğundur.

5. Vurnuxma ilə yanaşı, HG yan sürətə də malik olarsa:

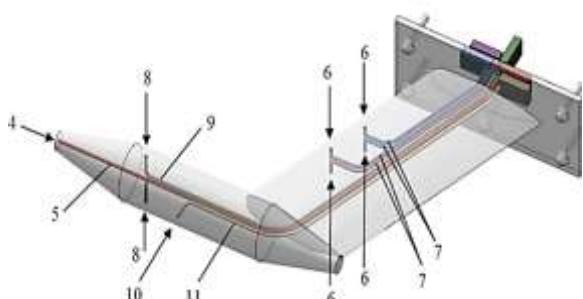
$$\begin{cases} \psi \sim (P_{yan\ stat5} - P_{yan\ stat1}) = (P_{yan\ stat2} - P_{yan\ stat6}) \\ v_{yan} \sim (P_{yan\ stat1} - P_{yan\ stat2}) = (P_{yan\ stat5} - P_{yan\ stat6}) \end{cases}$$

Şəkil 4, 5, 6-da təqdim edilən, hava gəmilərinin fəza vəziyyətinin, vurnuxmasının və yan sürətinin ölçülməsini təmin edən və müxtəlif nöqtələrdə quraşdırılan smart təzyiq qəbuledicilərindən ibarət aerometrik qurğular verilmişdir.



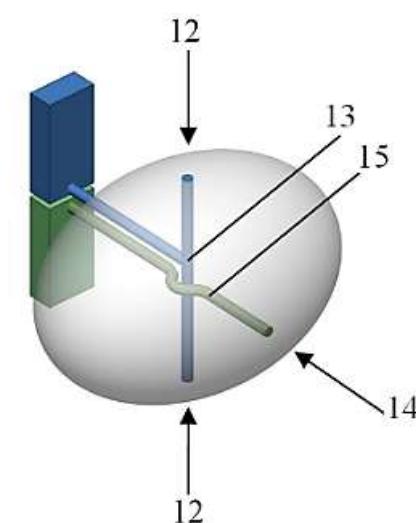
Şəkil 4 – Smart təzyiq qəbuledicisi (böyük olmayan hücum bucağı üçün)

Figure 4 – Smart probe (for a small angle of attack)



Şəkil 5 – Smart təzyiq qəbuledicisi (böyük hücum bucağı üçün)

Figure 5 – Smart probe (for a high angle of attack)



Şəkil 6 – Smart təzyiq qəbuledicisi (qanadın uclarında quraşdırılan)

Figure 6 – Smart probe (on the wingtip)

Şəkil 5 və şəkil 6-da füzelyajın ön hissəsinin sol və sağ tərəflərində quraşdırılmış dörd dəst təzyiqlər qəbuledicisinin birinin tərkib hissələri əks etdirilmişdir. Şəkil 5-də böyük olmayan hücum bucaqlarında manevr edən təyyarələr, şəkil 6-da isə böyük hücum bucaqlarında manevr edən təyyarələr üçün nəzərdə tutulan qurğular əks olunmuşdur.

Təzyiq qəbuledicilərinin girişində havanın daxil olduğu dəliklər oxlarla işarələnib. Qəbuledicilər tam təzyiq qəbuledicidən 4, onun boru xətti 5 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib); hücum bucağını xarakterizə edən diferensial təzyiq qəbuledicilərdən 6, onun boru xətti 7 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib); statik təzyiq qəbuledicilərdən 8, onun boru xətti 9 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib); prototipdən fərqli olaraq, yan statik təzyiq qəbuledicilərdən 10, onun boru xətti 11 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib); prototipdən fərqli olaraq, vurnuxma və yan sürəti ölçən əlavə quraşdırılmış hesablayıcılardan (sxemdə göstərilməyib) ibarətdir. Böyük hücum bucaqlarında hücum bucağını ölçmək üçün diferensial təzyiq qəbuledicilərinin 6 təzyiq qəbuledicilərinin dayaq tərəfində yerləşdirilməsi məqsədə uyğun hesab edilir [10, 11].

Şəkil 6-da qanadın sol və sağ tərəf uclarında və füzelyajın arxa hissəsinin sol və sağ tərəflərində quraşdırılmış smart təzyiq qəbuledicisinin əsas elementləri verilmişdir. Bu elementlər statik təzyiq qəbuledici 12, onun boru xətti 13 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib); prototipdən fərqli olaraq yan statik təzyiq qəbuledicisi 14, onun boru xətti 15 və buzlaşma əleyhinə qızdırıcılarından (sxemdə göstərilməyib), prototipdən fərqli olaraq tanqaj və kren bucaqlarını ölçən əlavə quraşdırılmış hesablayıcılardan ibarətdir.

Nəticə

Əlavə ölçülən parametrlər HSS kompüterlərdə hesablaşdırıldıqdan sonra, informasiya etibarlılığının və uçuşun təhlükəsizliyinin artırılması məqsədilə, müvafiq elektrik signalları vizual və audio xəbərdarlıq, mühafizə, uçuşun avtomatik idarəetmə sistemlərinə ötürülür.

Bu informasiyalar əsasında müvafiq vizual və audio xəbərdarlıq, mühafizə, uçuşun avtomatik idarəetmə sistemlərindən istifadə edilməklə uçuşların təhlükəsizliyinin artırılma-

sı son dərəcə vacibdir. Belə ki, statistikaya əsasən ümumi aviasiya qəzalarının 20%-ə qədər olan hissəsi məhz fəzada istiqamətlənmənin pozulması səbəbindən baş verir. Bunlardan 90%-nin faciəvi sonluqla nəticələndiyini nəzərə alsaq, təklif edilən metod və qurğunun əlavə informasiya mənbələri kimi istifadə olunması HSS texniki imkanlarının genişləndirilməsi ilə yanaşı, uçuşların təhlükəsizliyinin artmasına şərait yaradır.

REFERENCES

1. Instrumentation. JAA ATPL. Theoretical knowledge manual. Oxford Aviation, Frankfurt, Germany, 2001, pp. 392-394. (*in English*)
2. Kərimli T.İ. Mülki hava gəmilərdə hava signalları sisteminin texniki imkanlarının genişləndirilməsi. Bakı: MAA, *Elmi Məcmuələr*, 2016. Cild 18, №2, s. 27-34. (*in Azerbaijani*)
3. Airbus A340-500/600 Technical Training Manual. Navigation. Airbus S.A.S. 31707. Blagnac Cedex, France. August 2003, pp. 6-13. (*in English*)
4. Boeing 747-8. Aircraft Maintenance Manual. Navigation. The Boeing Company, 2015. Section 34-11-00. pp. 2-19, Section 34-25-00, pp.1-29. (*in English*)
5. Boeing 787 Training Student Lab Notebook Navigation Systems - Avionics Book. The Boeing Company, 2010, pp. 6-38. (*in English*)
6. Kərimli T.İ., Neymatov V.A., Kərimli V.İ. Pyezoelektrik özüsazlanan giroskop-akselerometrin iş rejimləri. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2018. Cild 10, №1. s.7-15 (*in Azerbaijani*)
7. Sensors and Integrated Systems: [Electronic resource] Smart probes. URL: www.goodrich.com. Goodrich. (*in English*)
8. Embraer E-Jet 170, 190. Maintenance Training Manual. Navigation system. July 2011, pp.17-37. (*in English*)
9. Erkolayn B. Poterya prostranstvennoy orientasii v aviasii: issledovaniya, vlianiya na bezopasnost polyetov, resheniye problem. Mejdunarodnyy seminar “Prostranstvennaya orientirovka v aviasii. Issledovaniya, vliyanie na bezopasnost poletov, puti resyeniya problemy”. Sankt-Peterburg, 28-29 aprela, 2010, s. 12-16. (*in Russian*)
10. Kərimli T.İ., Kərimli V.İ. Hava gəmilərinin fəza vəziyyətinin, vurnuxmasının və yan sürətinin ölçülməsinin aerometrik üsulu və qurğusu. Azərbaycan Respublikası. Patent-ixtira. İddia sənədinin № a2017 0019, 31.05.2021 (*in Azerbaijani*)
11. Pashayev A.M., Hazarkhanov A.T., Karimli T.I., Neymatov V.A., Karimli V.I. Aerometric method and device (system) for measuring aircraft spatial position, yaw and lateral velocity. United States Patent Application Publication, US 2019/0137537 Al. 2019 (*in English*)

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

I.Z. Sadikhov

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

For correspondence:

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

Abstract

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

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

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_15_19

Received 21.03.2022
Revised 11.06.2022
Accepted 19.06.2022

For citation:
Sadikhov I.Z.

[Calibration of KA-14 LIDAR to measure the fluorescence spectra of oils extracted in various zones]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 15-19 (*in English*)

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

İ.Z. Sadıxov

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

Yazışma üçün:

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

Xülasə

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

Açar sözlər: lazer zondlama, LIDAR, flüoressensiya, neft çirkənmələri.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_15_19

УДК: 535.372

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

И.З. Садыхов

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

Для переписки:

Садыхов Ильхам / e-mail: mrsadikhov90@gmail.com

Аннотация

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

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

Introduction

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

range of light, and is more noticeable in the spectral range of 270-500 nm [8-11].

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

Methodology

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

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

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

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

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

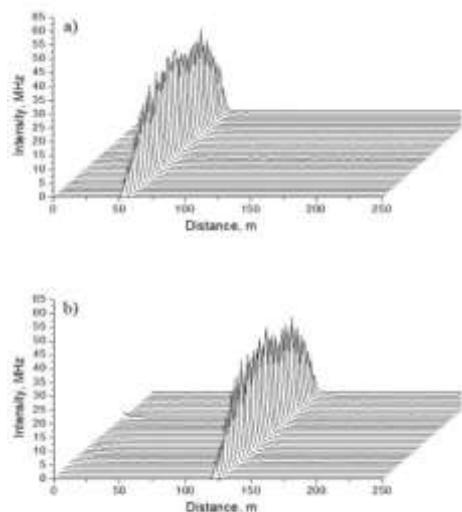


Figure 1 – Fluorescence spectra of oil stain sprinkled on asphalt from (spectra were detected by KA-14 LIDAR): a) 50m and b) 120m via KA-14 LIDAR

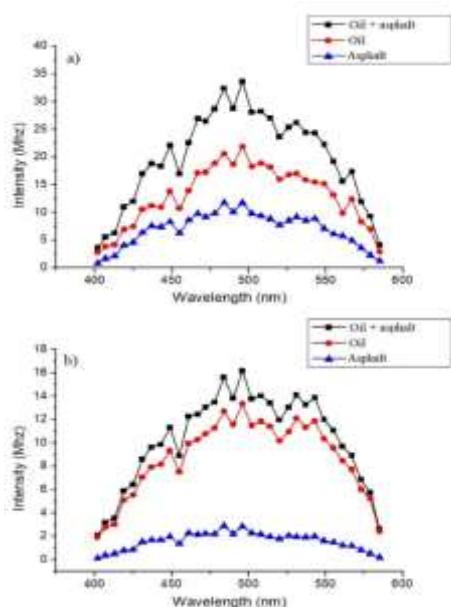


Figure 2 – Integral spectra of oil stain, oil and asphalt on asphalt a) 50m and b) 120m distance drawn

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

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

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

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

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

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

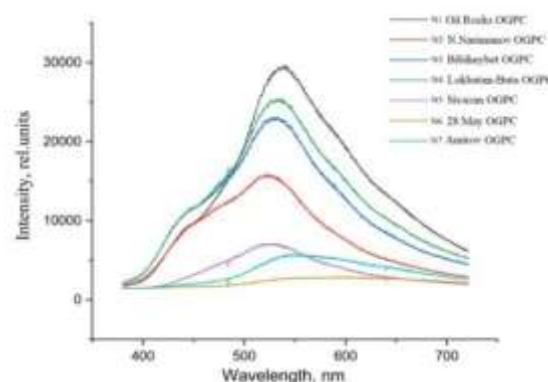


Figure 3 – Spectra of 7 different samples of crude oil belonging to SOCAR Oil-Gas Producing Companies by KA-14 LIDAR

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

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

Conclusion

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

The creation of the database based on this feature will allow determination of which one of OGPs belongs this leakage.

It should be noted that currently, work is underway to measure Raman spectra of crude

oil samples and to include these spectra in the database.

Acknowledgments

This work was partly supported by the State Oil Company of Azerbaijan Republic and the author is gratefully thanks for this support.

Author thanks also academician A.M. Pashayev and professor K.R. Allahverdiyev for supporting this research.

REFERENCES

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

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

**A.Kh. Janahmadov¹, D.A. Volchenko², N.A. Volchenko³,
V.S. Skrypnyk², D.Yu. Zhuravlev², L.B. Malyk⁴**

¹ Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

² Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

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

⁴ Drohobich College of Oil and Gas (Qrushevski str. 57, Drohobich, 82100, Ukraine)

For correspondens:

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

Abstract

The article examines the following questions: thermal conductivity and thermoelectric phenomena in tribocouplings; electro-kinetic phenomena and chemical reactions in tribocouplings; the discussion of the results. An algorithm of non-equilibrium thermodynamics is proposed, which contains thermal conductivity and thermoelectric phenomena in a non-massive metal friction element and electrokinetic phenomena in the near-surface layers of a polymer lining. In linear modes of operation of friction pairs of brakes, it is shown that due to the cross effect with temperature gradients for metal elements, two equilibrium states are revealed - a steady surface temperature and a thermal stabilization state; for a polymer lining, the equilibrium state is considered to be the burnout of the binder components from its near-surface layer with the formation of liquid islands. The flow of electrokinetic phenomena in the near-surface layer of the polymer lining and the determination of: the potential of the fluid flow and the resulting electric current; effect of electro-osmosis and liquid pressure. From the above parameters, ratios are formed that are equal to the Onsager and Saxen ratios, which makes it possible to determine the parameters by calculation.

Keywords: nonequilibrium thermodynamics, linear mode, friction pair, metal and polymer friction elements.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_20_30

Received 28.03.2021
Revised 18.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A., Skrypnyk V.S., Zhuravlev D.Yu., Malyk L.B.
[Non-equilibrium thermodynamics with linear modes in tribocouplings (Part I)]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 20-30 (in English)

Triboqovşaqlarda xətti rejimli qeyri-müvazinat termodinamikası (I hissə)

Ə.X. Canəhmədov¹, D.A. Volçenko², N.A. Volçenko³,
V.S. Skriпnіk², D.Y. Juravlev², L.B. Malik⁴

¹Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

²İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç.15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

³Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

⁴Droqobiç İxtisaslaşdırılmış Neft və Qaz Kolleci (Qruşevskiy küç. 57, Droqobiç, 82100, Ukrayna)

Yazışma üçün:

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

Xülasə

Məqalədə, triboqovüşmalarda istilik keçiriciliyi və termoelektrik hadisələr; elektrokinetik hadisələr və kimyəvi reaksiyalar nəzərdən keçirilib. Qeyri-müvazinat termodinamika alqoritmi təklif olunub ki, bu alqoritm də qeyri-kütləvi metal friksion elementində istilik keçiriciliyi və termoelektrik hadisələr, polimer kündənin üst təbəqələrində elektrokinetik hadisələr mövcuddur. Onsager və Saksen nisbətlərinə bərabər olan nisbətlər formalasdırılmışdır ki, bu da parametrləri hesablama yolu ilə müəyyənləşdirməyə imkan verir.

Açar sözlər: qeyri-müvazinat termodinamika, xətti rejim, sürtünmə cütü, metal və polimer friksion elementləri.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_20_30

УДК: 678.048.3

Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжениях (часть I)

А.Х. Джанахмедов¹, Д.А. Вольченко², Н.А. Вольченко³, В.С. Скрыпнык²,
Д.Ю. Журавлев², Л.Б. Малык⁴

¹ Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

² Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

³ Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

⁴ Дрогобычский специализированный колледж нефти и газа (ул. Грушевского, 57, г. Дрогобыч, 82100, Украина)

Для переписки:

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

Аннотация

В статье рассматривается: теплопроводность и термоэлектрические явления в трибосопряжениях; электрохимические явления и химические реакции в трибосопряжениях. Предложен алгоритм неравновесной термодинамики, который содержит теплопроводность и термоэлектрические явления в немассивном металлическом трением элементе и электрохимические явления в приповерхностных слоях полимерной накладки. Сформированы отношения, которые равны соотношениям Онсагера и Саксена, что позволяет определять параметры расчетным путем.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, линейный режим, пара трения, металлический и полимерный тренировочные элементы.

Introduction

For the state of friction pairs of brakes close to equilibrium, a general theory can be formulated based on linear relations (Onsager and Saxen) as applied to a metal friction element and a friction lining. In this case, non-massive metal friction elements are considered. For the latter, an equilibrium state is observed for a steady surface temperature, when its gradient becomes minimal.

The second equilibrium state is thermally stabilized, when the minimum temperature gradient is reached across the thickness of the metal friction element. As for the friction lining, its near-surface layer undergoes destructive changes at a temperature above the permissible one [1].

Analysis of literature data and statement of the problem

The study [2-6] indicates that with an increase in the relative humidity of the air in friction pairs, an increase in the wear of their working surfaces is observed, caused by an increase in the friction moment. In addition, it is noted that an increase in environmental humidity can cause an increase in the wear of a polymer friction element by more than 200 times [1].

At the same time, it was noted in [2, 5] that with an increase in the partial pressure of water vapor in the intercontact gap of friction pairs, the friction moment decreases, and, consequently, the wear of the friction material decreases.

Thus, it follows from the considered works that the relative humidity of the air entering the intercontact zone of friction pairs carries an additional load and causes a change in their operating parameters.

The effect of moisture on the tribological parameters of friction units of brake devices must be considered through the prism:

- corrosion due to exposure to moisture, salt or other environmental components;
- direct conversion of thermal energy into electrical energy in friction pairs;
- electric balance of currents in the zone of contact of friction pairs;
- intercontact gaseous medium in friction units;
- nanotribological processes that occur on the working surfaces of friction pairs and in the near-surface layers of friction linings.

All this must be considered from the point of view of the influence of nonequilibrium thermodynamics on the energy load of friction pairs of brakes with linear operating modes in their tribocouples. The paper [7] illustrates the equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics as applied to the surface layer of a polymer lining, which is in the solid state and in phase transitions of the 1st and 2nd order.

Using the mathematical apparatus, taking into account the electrons and ions of the surface layer of the overlay, a consistent system of three states is built, the criterion for evaluating which is the thermodynamic limit.

However, none of the listed works noted cross effects in tribocouplings and the determination of relative parameters relating to the thermal conductivity of metal friction elements and thermokinetic phenomena in the near-surface layer of the polymer lining.

This is achieved using the Onsager and Saxen relations, when triboconjugations are considered from the standpoint of nonequilibrium thermodynamics with linear loading modes [8].

Formulation of the problem

Main questions of the article: thermal conductivity and thermoelectric phenomena in tribocouplings; electrokinetic phenomena and chemical reactions in tribocouplings; the discussion of the results.

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

Modes of operation of friction pairs of brake devices

The modes of operation of the drum-and disk-shoe brakes of vehicles, as well as the band-shoe brakes of drawworks are aperiodic cyclic. The testing of braking devices of vehicles is carried out according to the standards of the United Nations Economic Commission for Europe [6] on three types of modes: "0", "I", "II". The zero type of test refers to the preliminary. Both during the first and second types of testing of drum and disc brakes of vehicles, temperatures develop on their friction surfaces that exceed those allowed for friction lining materials. However, they do not reduce the effectiveness of drum and disc brakes due to the ingress of moisture on their working surfaces during the movement of vehicles.

Stabilization thermal state of the metal friction element corresponds to thermodynamic equilibrium, in which the internal parameters of the system are the same. In this case, the brake drum or brake pulley have a complex shape and all their internal parameters do not depend on the coordinates. From this point of view, the process of establishing thermodynamic equilibrium can be considered as a process of equalizing

internal parameters, which is accompanied by the transfer of thermal energy from metal friction elements to their flanges and fastening protrusions until we have a negative heating rate of the metal friction element with a positive heating rate of its flange. It is known that in thermodynamic processes temperature is defined as a parameter whose constancy characterizes the position of thermodynamic equilibrium. In addition, the temperature equalization of metal friction elements and their flanges and mounting protrusions is accompanied by convective and radiative heat transfer from their matte surfaces. From this point of view, temperature belongs to generalized thermodynamic potentials, and its deviation from the equilibrium level determines the intensity of the heat transfer process [6-8] depending on whether the metal friction element is heated or forced to cool.

Initially, consider the process of heating a metal friction element. In the steady state, the energy W_p entering the system from the outside, due to the dissipation of mechanical energy into thermal energy during the implementation of specific loads ($W_H + \Delta W$) in the friction units of the brake devices, should dissipate into the environment from the matte surfaces of the metal friction elements.

When a disturbance appears in the tribosystem (in the form of water drops or thermal-oxidative destruction of the binder components of polymer friction materials at temperatures above the permissible level), the thermal state of metal friction elements changes. Let us assume that the perturbation manifests itself in a change in only one parameter Π , i.e., the surface temperatures of the metal friction elements, and it is they that determine their further thermal regime. It was further established that the change is small,

i.e., that only such deviations are considered at which the segments of the temperature curves that determine the thermal regime can be considered linear. In a disturbed thermal regime, when energy is redistributed between the matte and polished surfaces of a metal friction element due to the forced cooling of the latter (when $\Delta\Pi$ appears), this balance is disturbed, since the properties of the tribosystem change, in which energy is absorbed. If the properties of the tribosystem are such that the energy consumption $W=W_H + \Delta W$ after the deviation of the thermal regime (after the disturbance) will occur more intensively than the increase in energy $\Delta W_H=f(\Pi)$, which the next interaction of friction nodes can give after the disturbance, then the new (perturbed) the thermal regime leads in the tribosystem to maintaining the previous thermal regime (or a regime close to it), i.e. tribosystem will be stable. From this definition of stability (stability) it follows that the mathematically written condition for its conservation, or. as they say, the criterion of stability K will be the condition

$$\Delta W / \Delta \Pi > \Delta W_H = \Delta \Pi$$

or in differential form $d(V_p - W)d\Pi < 0$.

We introduce the notation $W_P - W = \Delta W_E$ and call it excess energy. This energy is positive if the additional energy of the thermochemical reaction of destruction of the binding components of the materials of the friction linings and radiation heat exchange between the working surfaces of the friction pairs of the brake device will increase more intensively than the load energy of the tribosystem, including losses for friction work in its friction units. The stability criterion is now written in the form

$$K = \frac{d(\Delta W_E)}{d\Pi} < 0 \quad \text{or} \quad K < 0.$$

The thermal regime is stable if the derivative of the excess energy with respect to the defining parameter Π , i.e., the temperature is negative for the polished surfaces of the friction metal element of various types of brake devices. It should be noted that a small fraction of the energy of the metal friction element is spent on the formation of a double electric layer according to the scheme "the polished surface of the metal friction element is the working surface of the friction lining" [9].

A sharp change in the specific fractions of the heat of the working area of the friction lining, which goes to the accumulation of heat with the surface layer, can be traced in the middle of the long test mode of the drum-shoe brake, after which the heating rate stabilizes and becomes equal to the lower level of the surface layer of the lining. This is explained by the fact that in the surface layer of the lining begins the interaction of the components of friction materials, which are in the nature of endothermic reactions.

At the same time, a significant part of the energy goes to the formation of a double electric layer "the working surface of the friction linings (not interacting with the metal friction element) - the lower level of the surface layer of the linings", as well as to the release of the gas mixture and its ionization, and to the desorption of moisture from liquid fractions formed in the surface layers of the overlays.

In addition, in the future, after half the time of prolonged heating, the inversion of electrification currents is possible according to the scheme "polished surface of a metal friction element - ionized gaseous medium", and moisture desorption - "working surface of friction linings - lower level of the near-

surface layer of linings" with a positive quasi-stable their heating rate.

As for the cooling rates of the working zone of the near-surface layer and its lower level of the friction lining, by the end of the fourth minute (after completion of the tests) they stabilize at negative cooling rates.

Energy ΔW_E should be determined for the tribosystem as a whole, taking into account all the influencing processes (heating, cooling, radiative heat transfer and thermochemical destruction of the binding components of the friction material) - working surfaces of linings" ($K<0$) (and interacting with a metal friction element) and "working surfaces of linings - a metal friction element", interconnected by an ionized gas mixture and moisture desorption. The inversion of the currents is carried out in the opposite direction, i.e., the sign of the electrification currents changes.

Carried out according to the above criterion of stability (stability) of the tribosystem according to the ratio: the emissivity coefficients of the polished and matte surfaces of the metal friction element and the energy of thermochemical reactions occurring during the destruction of the binder components located in the friction lining and

their energy characteristics in pure form, i.e. without structural connections with other components in the lining, shows the intensity of the external impact on the tribosystem from the point of view of stabilizing the thermal state of its metal friction element when the physical and chemical properties of the surface layers of the friction linings change.

Thermal conductivity and thermoelectric phenomena in tribocouplings

Let us dwell briefly on the basic principles that take place in thermal problems.

Reciprocity is used in solving some problems of heat conduction; this means that if the heat source is located at point 1 causes a temperature change $\Delta t = f(\tau)$ at point 2, then if the source is moved to point 2, the same temperature change Δt will occur at point 1.

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

The importance of applying the reciprocity principle in problems of heat conduction is known [1].

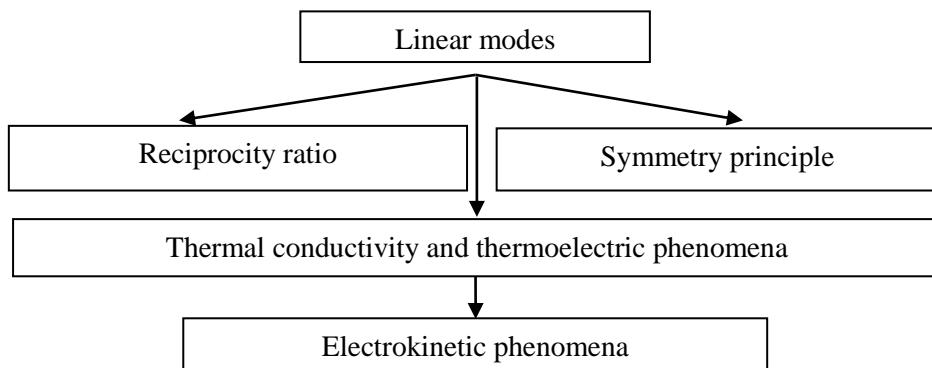


Figure 1 – Algorithm of nonequilibrium thermodynamics with linear regimes in tribocouplings

These include under the action of a heat source: in a semi-limited body or in an unlimited plate; a plate covered with a layer of turbulent fluid, as well as in a plate in the presence of a fluid layer and an adiabatic condition on one boundary, and a type III-rd boundary condition on the other.

Symmetry - proportionality, proportionality of the parts of the product located on both sides of the middle of the center. On fig. 1 shows the algorithm of non-equilibrium thermodynamics in triboconjugations of brake friction pairs.

In metal friction elements of brake devices, the heat flux may differ in direction from the temperature gradient; a temperature gradient in one direction can cause heat flow in the other direction. Entropy production is determined by the expression

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

where J_{qi} – heat flow; x_i – Cartesian coordinates; T – surface temperature.

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

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

where L_{ik} – Onsager ratio.

For anisotropic solids, the thermal conductivity is a second rank tensor. Fourier's law in this case is written as

$$J_{qi} = - \sum_k k_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (3)$$

Based on comparison (2) with (3), we obtain the equality

$$L_{ik} = T^2 k_{ik}. \quad (4)$$

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

$$k_{ik} = k_{ki}, \quad (5)$$

i.e., thermal conductivity is a symmetrical tensor. For many metallic friction elements, their symmetry of their crystal structure implies that $k_{ik} = k_{ki}$. However, this does not at all mean confirmation of the reciprocity relations, since it follows from the trigonal, tetragonal, and hexagonal symmetry of crystals that

$$k_{12} = -k_{21}. \quad (6)$$

If the reciprocity relations are valid, then $k_{12} = k_{21} = 0$. (7)

Equation (7) implies that a temperature gradient in the x direction causes a heat flow in the positive y direction, but a gradient in the y direction causes a heat flow in the negative x direction. It follows from Onsager's reciprocity relation that the validity of the reciprocity relation is confirmed.

A parameter such as the temperature gradient ($1/T$) in the interface of friction pairs can cause a heat flow, but also other flows, such as an electron flow, and as a result, an electric current. The thermoelectric effect is one of the cross effects, in which the temperature gradient causes not only a heat flux, but also an electric current, and vice versa (Fig. 2 a, b).

Thermoelectric effect is a cross effect between thermodynamic parameters, heat and electric flows. According to fig. 2 a shows the Seebeck effect, in which two dissimilar metal conductors are connected in a circuit, and each connection is at different temperatures.

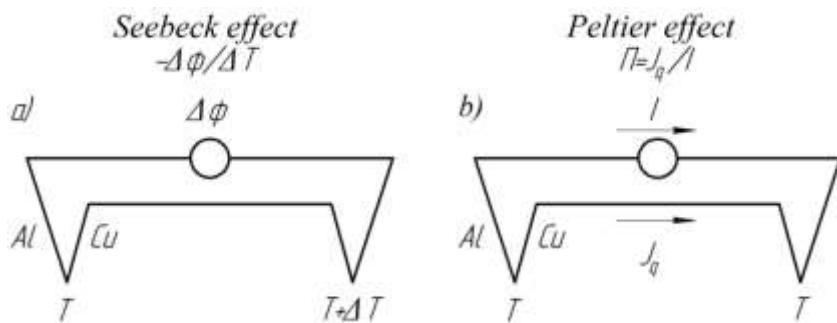


Figure 2 a, b – Basic thermoelectric phenomena in tribo-couplings

As a result, an EMF is generated. The last component, $\sim 10-5$ V/K, may differ from sample to sample. In the Peltier effect (Fig. 2 b), two compounds are at the same temperature and a current passes through them.

Electric current leads to the appearance of a heat flow from one connection to another. The Peltier heat flux is typically $\sim 10-5$ J/(s·A).

The Seebeck effect gave rise to the Peltier effects and the accompanying Thomson, Joule - Lenz effects. The last two are that if there is a temperature difference along the conductor through which the electric current flows, then heat is released or absorbed (depending on the direction of the current) in the volume of the conductor.

To reduce the effect of heat on electrical circuits, the distribution of the Peltier effect is used, which consists in the uneven presence of the concentration of alloying elements in the branches of the electrical circuit.

According to Table 1 Osnager reciprocity relations for Cu-Al thermocouple is the minimum value (0.77), and for the Cu - Bi thermocouple - the maximum value (1.0 V) due to the different position in the table of D.I. Mendeleev and a significant difference in atomic weights.

Table 1 – Experimental data confirming the Osnager reciprocity relations when operating thermocouples in a linear mode

Thermocouple	T, °C	Π/T , $\mu\text{V}/\text{K}$	$-\Delta\phi/\Delta T$, $\mu\text{V}/\text{K}$	L_{qe}/L_{eq}
Cu - Al	15,8	2,4	3,1	0,77
Cu - Ni	0	18,6	20,0	0,930
Cu - Ni	14	20,2	20,7	0,976
Cu - Fe	0	-10,16	-10,15	1,00
Cu - Bi	20	-71	-66	1,08
Fe - Ni	16	33,1	31,2	1,06
Fe - Hg	18,4	16,72	16,66	1,004

The design of the drawworks band-shoe brake has symmetry (Fig. 3). The symmetry of the design does not mean that the energy load of the left and right brakes is the same due to the non-equilibrium thermodynamics that take place in their friction pairs.

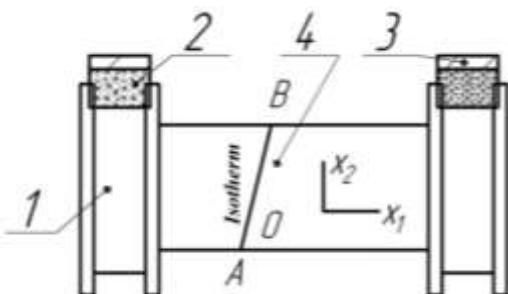


Figure 3 – Symmetrical arrangement of band-shoe brakes in a drawworks: 1 – brake pulleys; 2 - friction lining; 3 - brake band; 4 – drum

Electrical phenomena in tribocouplings

Electro-kinetic phenomena correspond to the interaction between the microelectric current and the flow of liquid entering the interfaces of friction pairs.

Let us consider two parts of the friction lining 1, 2 (Fig. 4 a), separated by a porous partition. If a voltage V is applied between the two parts of the lining 1 and 2, then the current flows until the pressure difference Δp takes a stationary value. This pressure difference is called electroosmotic pressure.

On the contrary, if the fluid flow J from one part of the lining 1 to another 2 is created by the specific loads of the metal friction element 3 (Fig. 4 b), then a microelectric current flows between the electrodes, called the flow current. The electroosmotic effect is successfully used to remove moisture from the friction surfaces of interfaces of braking devices [10].

As before, the thermodynamic description of these effects begins with a formula for the production of entropy under the above conditions. In this case, we have an essentially discrete system in which there are no gradients, but there is a difference in chemical potentials between the two parts of the patch.

For discrete systems, which are friction pairs, the entropy production per unit volume s is replaced by the total entropy production d_iS/dt .

In addition, the entropy produced by the flow from the first part of the lining to the second can be formally represented as a chemical reaction, for which the difference in electrochemical potentials is converted into affinity.

In this way,

$$\frac{d_iS}{dt} = \sum_k \frac{\tilde{A}_k}{T} \frac{d\xi_k}{dt}, \quad (8)$$

where

$$\tilde{A}_k = (\mu_k^1 + z_k F \phi_1) - (\mu_k^2 + z_k F \phi_2); \quad (9)$$

$$d\xi_k = -dn_k^1 = dn_k^2. \quad (10)$$

In the given dependences, the superscripts indicate two volumes of the overlay: z_k is the ion charge of component k , F is the Faraday constant, and ϕ is the electric potential.

For a relatively small pressure difference between the two parts of the patch, since $(\partial \mu_k / \partial p) = v_k$ is the partial molar volume, we can write

$$(\mu_k^1 - \mu_k^2) = v_k \Delta p \quad (11)$$

Dependence (9) after transformations has the form

$$\frac{d_iS}{dt} = \frac{1}{T} \sum_k \left(-v_k \frac{dn_k^1}{dt} \right) \Delta p + \frac{1}{T} \sum_k (-I_k) \Delta \phi \quad (12)$$

where $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$ и $I_k = z_k F n_k^1 / dt$ - electric current due to fluid flow k .

After a series of substitutions and transformations, calculated dependencies (13-18) were obtained (Table 2).

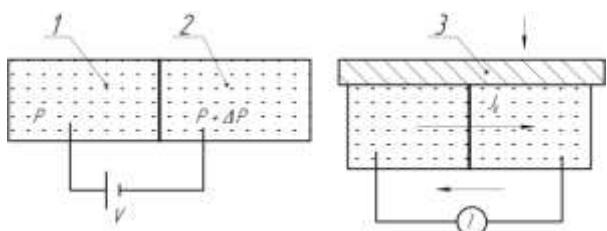


Figure 4 a, b – Electrokinetic phenomena in a friction lining at rest (a) and under the action of specific loads (b) in a friction pair: 1 - friction lining; 2 - capillary; 3 - metal friction element

Table 2 – Parameters and their ratios in friction linings of tribocoupling

Parameters and ratios		Estimated dependencies
Onsager relations	Flow potential	$\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p} \right)_{I=0} = -\frac{L_{12}}{L_{11}} = 0,95 ;$ (13)
	Electroosmosis	$\left(\frac{J}{I} \right)_{\Delta p=0} = \frac{L_{12}}{L_{11}} = 0,97 ;$ (14)
	Electroosmotic pressure	$\left(\frac{\Delta p}{\Delta\phi} \right)_{J=0} = -\frac{L_{12}}{L_{22}} = 1,06 ;$ (15)
	Fluid flow current	$\left(\frac{I}{J} \right)_{\Delta\phi=0} = \frac{L_{12}}{L_{22}} = 1,04 ;$ (16)
Saxen ratios		$\left(\frac{\Delta\phi}{\Delta p} \right)_{I=0} = -\left(\frac{J}{I} \right)_{\Delta p=0} = 0,9 ;$ (17)
		$\left(\frac{\Delta p}{\Delta\phi} \right)_{J=0} = -\left(\frac{I}{J} \right)_{\Delta\phi=0} = 0,98 .$ (18)

The friction lining FK-24A, located on the incoming branch of the brake band, was studied at a surface temperature of 390 - 430° C, when formaldehyde resin burned out from the surface of the lining and the formation of liquid islands was observed (see Table 2) at a difference in specific loads of 0,3 MPa between the incoming and outgoing surface of the lining showed the following:

- the Onsager ratio for the considered parameters varied from 0,95 to 1,06;
- dependencies (17, 18) are called the Saxen relation and when using the formalism of nonequilibrium thermodynamics, their validity is more general and their values vary from 0,9 to 0,92.

Discussion of results

Studies of non-equilibrium thermodynamics with linear regimes in tribocouples of friction pairs based on the reciprocity relation and symmetry principles made it possible to establish the following:

- an algorithm of non-equilibrium thermodynamics is proposed, which contains thermal conductivity and thermoelectric phenomena in a non-massive metal friction element and electrokinetic phenomena in the near-surface layers of a polymer lining;

- in linear modes of operation of friction pairs of brakes, it is shown that due to the cross effect with temperature gradients for metal friction elements, two equilibrium states are revealed - a steady surface temperature and

a thermal stabilization state; for a polymer lining, the equilibrium state is considered to be the burnout of the binder components from its surface layer with the formation of liquid islands;

- the flow of electrokinetic phenomena in the near-surface layer of the polymer lining and the determination of: the potential of the liquid flow and the resulting electric current; effect of electroosmosis and liquid pressure;

- from the above parameters, ratios are formed that are equal to the Onsager and Saxen ratios, which makes it possible to determine the parameters by calculation.

Conclusion

Systematize and present in the form of algorithms, perturbations, potentials and gradients in the energy fields of metal-polymer friction pairs. The maximum energy load of metal friction elements and their heat transfer capacity, consisting in the combined action of conductive heat transfer with radiative and convective heat transfer from their surfaces, as well as the allowable temperature for polymer lining materials.

The initial conditions for a metal friction element must be variable, which would correspond to its steady state and its thermal stabilization state.

REFERENCES

1. **Pekhovich A.I.** Calculations of the thermal regime of solids / A. I. Pekhovich, V. M. Zhidkikh. L.: *Energy*, 1976. - 352 p. (in Russian)
2. **Muchnik G.F., Rubashov I.B.** Methods of the theory of heat transfer. Thermal radiation. M.: *Higher school*, 1974. - 272 p. (in Russian)
3. **Koshkin V.K., Kalinina E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.Ya.** Non-stationary heat transfer. M.: *Mashinostroenie*, 1973. - 328 p. (in Russian)
4. **Tsvetkov F.F., Grigoriev B.A.** Heat transfer. M.: MEI Publishing House, 2005. - 215 p. (in Russian)
5. **Kozdoba L.A.** Electrical modeling of heat and mass transfer phenomena. M.: *Energia*, 1972. - 296 p. (in Russian)
6. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Janahmadov E.A. et al.** Projektnyi i proverочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок. Baku: *Apostroff*, 2016. - 312 p. (in Russian)
7. **Zhuravlev D.Yu.** Thermodynamic limit of surface layers of polymer linings in frictional interaction. Kharkov: *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2014, No. 2/11 (68), s. 20-26 (in English)
8. **Chichinadze A.V., Berliner E.M., Braun E.D. et al.** Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics). Under total ed. A.V. Chichinadze. M.: *Mashinostroenie*, 2003. – 576 p. (in English)
9. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Nabizade K.T., Javadov M.Ya.** Tribology: Friction, Wear, Lubrication. Baki: *Apostrof-A*, 2019. - 640 p. (in Russian)
10. **Kindrachuk M.V., Volchenko D.A., Volchenko N. A., Stebeletskaia N.M., Voznyi A.V.** Influence of hydrogen on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units. master. sci. 2017, 53, pp.282-288 (in English)

Physical Methods for Assessing the Load of Friction Pairs of Braking Devices (Part II)

D.Yu. Zhuravlev¹, M.Y. Javadov², V.S. Skrypnyk¹,
N.A. Volchenko³, P.S. Krasin³, A.S. Evchenko³

¹ Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Karpatyska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

² Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

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

For correspondence:

Skrypnyk Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Abstract

In the first part of the paper, the attention is given to the main principles of the physical methods, as well as the "mechanical-thermal" loading of friction pairs of braking devices. In the second part of the paper, the analysis of principles is conducted and their impact on the energy fields of the brake friction pairs are illustrated. Based on the operation of the principles, the following energy fields are distinguished in pairs: "electric-heat," "chemical-thermal", and "electromagnetic". The "electric heat field" is based on the contact-pulse interaction of micro-protrusions of friction surfaces with various gradients of electrical potential and temperature under given boundary conditions. The "chemical-thermal" field rests on the model of a double electric layer in a pair of brake friction. The "electromagnetic" field is associated with a harmonic variable external electric field. Let us give an analysis of all energy fields.

Keywords: physical methods, braking devices, friction pair, methallic friction element, joint action of energy fields: "electric heat", "chemical-thermal", and "electromagnetic."

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_31_47

Received 27.03.2022
Revised 17.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Zhuravlev D.Yu., Javadov M.Y., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Krasin P.S., Evchenko A.S.
[Physical methods for assessing the load of friction pairs of braking devices (Part II)]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp.31-47 (in Russian)

Əyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodları (II hissə)

D.Y. Juravlev¹, M.Y. Cavadov², V.S. Skripnik¹,

N.A. Volchenko³, P.S. Krasin³, A.S. Yevchenko³

¹İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

²Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

³Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

Yazışma üçün:

Skripnik Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Xülasə

Məqalənin birinci hissəsində fiziki metodların ümumi prinsiplərinə, həmçinin əyləc qurğularının "məxanotermiki" gərginliyinə diqqət yetirilib. Məqalənin ikinci hissəsində prinsiplərin təhlili aparılıb və onların əyləcin sürtünmə cütünün enerji sahələrinə təsirinə qiymətləndirilib. Prinsiplərin təsirinə əsasən, aşağıdakı enerji sahələri cüt-cüt ayırd edilir: "elektro-termiki", "kimyəvi-istilik", "elektromaqnit". "Elektro-termiki sahə" verilmiş sərhəd şərtlərində müxtəlif elektrik potensial qradientinə və temperatura malik sürtünmə səthinin mikroçixıntılarının təmas-impuls qarşılıqlı təsirinə əsaslanır. "Kimyəvi-istilik" sahəsi əyləcin sürtünmə cütündə ikiqat elektrik təbəqəsi modelinə əsaslanır. "Elektromaqnit" sahəsi harmonik dəyişən xarici elektrik sahəsi ilə əlaqələndirilir. İşdə bütün enerji sahələrinin təhlili təqdim edilib.

Açar sözlər: fiziki metodlar, əyləc qurğuları, sürtünmə cütü, metal friksion elementlər, enerji sahələrinin birgə təsiri: "elektro-termiki", "kimyəvi-istilik", "elektromaqnit".

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_31_47

УДК: 541.11/123(075.8)

Физические методы оценки нагруженности пар

трения тормозных устройств (часть II)

Д. Ю. Журавлев¹, М. Я. Джавадов², В. С. Скрыпников¹,

Н. А. Вольченко³, П. С. Красин³, А. С. Евченко³

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

²Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

³Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

Для переписки:

Скрипников Василий / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Аннотация

В первой части статьи было уделено внимание общим принципам физических методов, а также «механо-тепловой» нагруженности пар трения тормозных устройств. Во второй части статьи выполнен анализ принципов и проиллюстрировано их влияние на энергетические поля пар трения тормозов. Исходя из действия принципов, выделены попарно следующие энергетические поля: «электротепловое», «химико-тепловое», и «электромагнитное». «Электротепловое поле» базируется на контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях. «Химико-тепловое» поле опирается на модель двойного электрического слоя в паре трения тормоза. «Электромагнитное» поле связано с гармоническим переменным внешним электрическим полем. Приводится анализ всех энергетических полей.

Ключевые слова: физические методы, тормозные устройства, пара трения, металлический фрикционный элемент, совместное действие энергетических полей: «электротеплового», «химико-теплового», и «электромагнитного».

Введение

Применение различных общефизических принципов открывает широкие возможности для расчета и анализа динамического и теплового режима металлических фрикционных элементов дисково-, барабанно- и ленточно-колодочных тормозных устройств и становится качественно новым методом решения динамических и тепловых задач.

Материалы статьи в значительной мере направлены на оценку «электротеплового», «химико-теплового» и «электромагнитного» энергетических полей пар трения тормозных устройств.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Остановимся кратко на применении физических принципов в динамических и тепловых задачах по оценке нагруженности пар трения тормозных устройств.

Принцип причинности нашел применение в ленточно-колодочных тормозах буровых лебедок [1]. Смысл принципа заключается в очередности рассмотрения эксплуатационных параметров: натяжения набегающей и сбегающей ветви, сила трения, нормальное усилие, удельная нагрузка, динамический коэффициент трения, тормозной момент, температуры (поверхностная, вспышки, объемная), механические и термические напряжения, износ.

Перечисление методов (аналитического, численного, аналогового, графического и экспериментального) и их анализ по определению поверхностных температур рабочих деталей тормозных устройств нашли отражение в работе [2].

Однако при анализе методов теплового расчета пар трения тормозов не были

рассмотрены методы физических принципов.

Эквивалентные электрические схемы использовались при моделировании на RC-моделях теплового режима элементов тормозного барабана транспортного средства. В данных исследованиях применен принцип взаимности между конструктивными параметрами обода барабана и его фланцем [3, 4].

Изучение электродинамики поверхностного слоя полимерной накладки показало, что в ее приповерхностном слое протекают активный I_a и реактивный I_r токи. Последние заменены эквивалентной электрической схемой с идеальным электрическим сопротивлением R и емкостью C [1].

В работе [5] для системы с электромагнитным полем выдерживались законы сохранения: массы, импульса и энергии. При этом не было уделено внимание ни одному физическому принципу оценки нагруженности системы.

Физические принципы могут применяться в различного рода соотношениях. Так, например, в соотношении взаимности Онсагера, когда речь идет о частицах, находящихся в поступательно и вращательно движущихся системах в тепловом, электрическом и электромагнитных полях [6]. Разрозненные данные по электрическим полям пар трения тормозных устройств заставили искать новый подход к их обобщению.

Постановка задачи

Следует решить проблему использования физических принципов применительно к парам трения тормозных устройств и рассмотреть фрикционное взаимодействие их следующих энергетиче-

ских полей: «электротеплового», «химико-теплового» и «электромагнитного», а также оценить особенности нагруженности пар трения тормозных устройств в этих энергетических полях.

Цель работы – обосновать применение физических методов к оценке нагруженности пар трения тормозных устройств.

Электрического с тепловым

Градиентная теория твердых тел и на границах межфазных слоев в интервале поверхностных температур ниже и выше допустимой для материала полимерной накладки позволит дать ответ на вопрос обеспечения положительного градиента механических свойств в поверхностных слоях металлополимерных пар трения тормозных устройств. Однако при этом существенное влияние оказывают градиенты электрического потенциала и температуры на взаимодействующих поверхностях пятен контактов микровыступов пар трения «полимер-металл» и по их глубине.

В табл.1 показано шесть случаев контактно-импульсного взаимодействия микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях. Кратко проанализируем каждый из случаев.

Первый случай. Асимметрия наблюдается в отдельных зонах там, где расстояние r от контакта велико по сравнению с радиусом a_n контактного пятна микровыступов A_k , которое в данном случае имеет форму круга.

Установлено, что градиент потенциала в зоне стягивания уменьшается по мере увеличения расстояния от контакта, при-

мерно как $1/a_n^2$. При этом общий пространственный заряд в отдельных зонах стягивания по величине почти такой же, как и заряды в непосредственной близости от пятна контакта. Следовательно, влияние удельных зарядов на электрическое поле в зоне стягивания пренебрежимо мало. Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении теплового поля.

Таким образом, асимметрия не нарушает закона зависимости вида $\varphi_3 - \vartheta$ в наиболее узких частях стягивания, так как градиенты температуры и напряжения в них велики, а асимметрия в отдельных зонах не отражается на общем напряжении стягивания и на разности температур θ контактной поверхности пятна взаимодействия.

Второй случай характерен для металлополимерных пар трения. При нагревании микровыступов поверхности контакта условия $(d\varphi_3/dn)_3 = 0$ и $(dt/dn)_3 = 0$ не соблюдаются, поскольку имеется разность температур между взаимодействующими пятнами контактов. При этом тепловой поток делится на две части: продольную (часть X) и поперечную (часть Y). Тепловой поток вдоль Y вызовет отклонение результатов расчета по зависимости (3) (см. табл. 1) примерно на величину $(W_x/W_y)100, \%$. Составляющие уравнения (3) определяются по зависимостям (1) и (2). После выполненных расчетов на основе значений параметров получили величину отклонения теплового потока $W_x/W_y < 0,05$, которой можно пренебречь.

Третий случай характерен для интенсивного массопереноса от микровыступов контактирующих поверхностей по схеме «полимер-металл» и наоборот. Он определяет энергетические уровни взаимодействия микровыступов пятен контактов согласно зависимостям (4) и (5).

Таблица 1 – Контактно-импульсное взаимодействие микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях

Table 1 - Contact-pulse interaction of micropromtrusions of friction surfaces with different gradients of electric potential and temperature under specified boundary conditions

№ п/п	Случай взаимодействия пятен контакта	Зависимости для оценки электрических и тепловых полей
1.	Положение электрического поля на пятне контакта: асимметричное;	$\frac{d\varphi_s}{dn}$ уменьшается как $1/r^2$; каждый q_n влияет как q_n/r ; не нарушается зависимость вида $\varphi_s - \vartheta$.
2.	симметричное с проводимостями, которые отличаются: существенно (пара «полимер-металл»)	$(d\varphi_s/dn)_3 = 0, (dt/dn)_3 = 0; \int_t^T \rho \kappa dt = 0,5\varphi_s^2$. (1) $W_X = 0,125a_n\lambda_n$; (2) $W_Y = \frac{S}{1,7a_n^2\lambda_3} + \frac{1}{2\pi a_n\lambda_n}$. (3)
3.	незначительно (пары: «металл-металл»; «полимер-полимер»).	$\left(\frac{d\varphi_s}{dn}\right)_3 = 0; \left(\frac{dt}{dn}\right)_3 = 0 \cdot \int_t^T \frac{\lambda}{\chi} dt = 0,5\varphi_s^2$; (4) $\int_0^T \rho \lambda_n dt = 0,125u^2$. (5)
4.	Биметаллические пятна контакта	$\int_t^T \frac{\lambda}{\chi} dt = 0,5\varphi_s^2$; (6) $(grad\varphi_s)_{A_{\phi_1}}$ отличается от $(grad\varphi_s)_{A_{\phi_2}}$
5.	Взаимодействие электрических и тепловых потоков: одинаковой плотности на пятне контакта;	$\left(\frac{d\varphi_s}{dn}\right)_3 = 0; \left(\frac{dt}{dn}\right)_3 = 0 \cdot \left(\frac{d\varphi_s}{dn}\right)_{A_{\phi_0}} \neq 0$ (7) $(dT/d\varphi_s)_{A_{\phi_0}} = 0$ заменяется эквивалентным условием $\frac{\lambda}{\chi} \left(\frac{dt}{d\varphi_s}\right)_{A_{\phi_0}} = Y. \quad \frac{\lambda}{\chi} \frac{dt}{d\varphi} = -\varphi; \quad \int_t^T \rho \lambda dt = 0,5\varphi_s^2 + Y\varphi_s$. (8) $\int_t^T \rho \lambda dt = 0,5u^2 + \Pi_1 u$. (9)
6.	При переносе теплоносителями электрического тока с поверхностным градиентом температуры	$Q = I\sigma_t d\vartheta$; (10) $d\left(\frac{\lambda}{\chi} \frac{dT}{d\varphi}\right) = -d\varphi; \left(\frac{dt}{d\varphi}\right)_{A_0} = 0; \frac{\lambda}{\chi} \frac{dT}{d\varphi_s} = -\varphi$; (11) $\int_t^T \rho \lambda_n dt = 0,5\varphi_s^2 - \int_0^\varphi d\varphi_s \int_t^T \sigma_t dt$. (12) $\sigma_t = \gamma_n \vartheta$; (13) $\int_t^T \rho \lambda_n dt = 0,5\varphi_s \left\{ \varphi_s - \gamma_n [(t_0 + T)^2 - t_0^2] \right\}$. (14)

Четвертый случай отличается от третьего градиентами $(grad\varphi_3)_{A\phi 1}$ и $(grad\varphi_3)_{A\phi 2}$, так как энергетические уровни металлов, входящих в биметалл, различны.

Пятый случай. Поверхность пятна контакта микровыступов $A_{\phi 0}$ удовлетворяет граничным условиям, но не удовлетворяет условию $(d\varphi_3/dn)_{A\phi 0}$, так как $A_{\phi 0}$ пересекается тепловым потоком, плотность которого пропорциональна плотности электрического тока j . Вследствие этого получаем Yj , где Y имеет единицу измерения напряжения. Поскольку тепловой поток пропорционален j , он не вносит изменений в систему элементарных линий тока.

В результате преобразований ряда зависимостей получили выражение (8) для оценки теплового потока в интервале температур $0 - t$ и при изменении температур от t до T [выражение (9)]. Часть теплоты Пельтье (Π_1) уходит в исследуемое пятно контакта и составляет тепловой поток $\Pi_1 J$, а u является напряжением зоны стягивания на нем.

Анализ зависимости (9) показывает, что при небольших величинах u , характерных для металлополимерных пар трения, эффект Пельтье вызывает заметное отклонение u от зависимости вида $\varphi_3 - t$.

Шестой случай характеризуется переносом теплоносителями электрического тока из более в менее нагретую зону пятна контакта, лежащую на пути его движения. Это осуществляется посредством эффекта Томпсона, интенсивность которого зависит от коэффициента Томпсона (σ_t). Записав количество теплоты (10), поступающей от сечения микровыступа с температурой $t + dt$ к соседнему сечению с температурой t с учетом граничных условий, и используя зависимость вида (12), после оконча-

тельного интегрирования получили выражение (13).

В дальнейшем применив условие, что при больших температурах металлического элемента трения σ_t пропорционален T , в окончательном виде получаем зависимость (14). Последняя связывает между собой параметры электрического и теплового полей, токи которых пронизывают пятна контакта микровыступов трущихся поверхностей.

При кратковременных торможениях при отсутствии теплоотдачи от матовых поверхностей шкива происходит интенсивное аккумулирование теплоты, которое может привести его к предельному тепловому состоянию его обода. Для упрощенного рассмотрения задачи теплопроводности пренебрегаем теплоотдачей в окружающую среду.

Химического с тепловым

Теоретические исследования нестационарных физико-химических процессов в контактном зазоре между микровыступами металлополимерных пар трения тормозных устройств при условии, что $K_{\varepsilon 3} \leq 1$ (коэффициент взаимного перекрытия пар трения), базируются на использовании основных положений теории: нестационарной диффузии; газовой динамики; химической кинетики и электротермомеханического трения.

При этом маловажная роль отводится процессам нестационарной доставки и потребления активного компонента среды в межконтактный зазор микровыступов металлополимерных пар трения. Общую роль занимают адсорбционные процессы, происходящие на металлическом фрикционном элементе.

Адсорбционные процессы сильно изменяют работу выхода электронов в процессе образования адсорбционной связи между свободным атомом или молекулой и поверхностным дипольным слоем. Изменение работы выхода электронов металлической поверхности фрикционного элемента адсорбированными атомами или молекулами прямо пропорционально их эффективному дипольному моменту и степени заполнения поверхности. При адсорбции возникает поверхностный двойной электрический слой, влияющий на изменения и распределения электронных зарядов в нем. Более того, работа, совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от того, как диполь (рис.1) расположен относительно (воображаемой) электро-

нейтральной плоскости. При этом электрон совершает работу по преодолению только полного или половины потенциала адсорбированного слоя. При этом необходимо учитывать тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки при выгорании связующих компонентов ее материалов при достижении допустимой температуры и выше ее молекулы образовавшегося растворителя сильно ориентированы, в результате чего их эффективный дипольный момент увеличивается по отношению к дипольному моменту поверхности металлического фрикционного элемента. Это обстоятельство и является одним из основных условий инверсии множества микротоков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического фрикционного элемента.

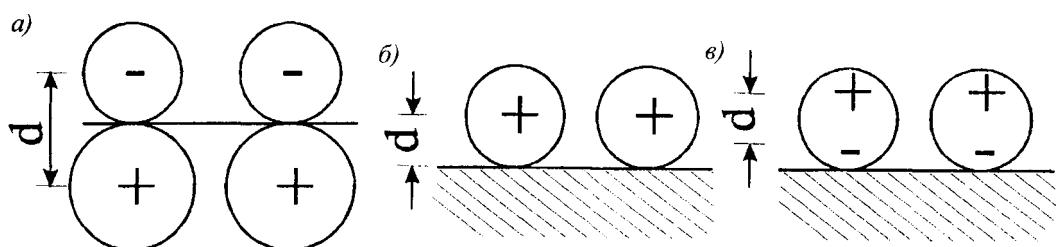


Рисунок 1 – Диполи, которые возникают при адсорбции на поверхности металла:
 а, б – хемосорбция: ковалентная; ионная; в – физическая сорбция (d – расстояние между центрами зарядов)
Figure 1 - Dipoli, which occur during adsorption on the metal surface:
 a, b - chemisorption: sow-tape; ionic; c - physical sorption (d - distance between charge centers)

Из вышеизложенного следует, что трибохимия занимает важное место в трибологии пар трения тормозных устройств.

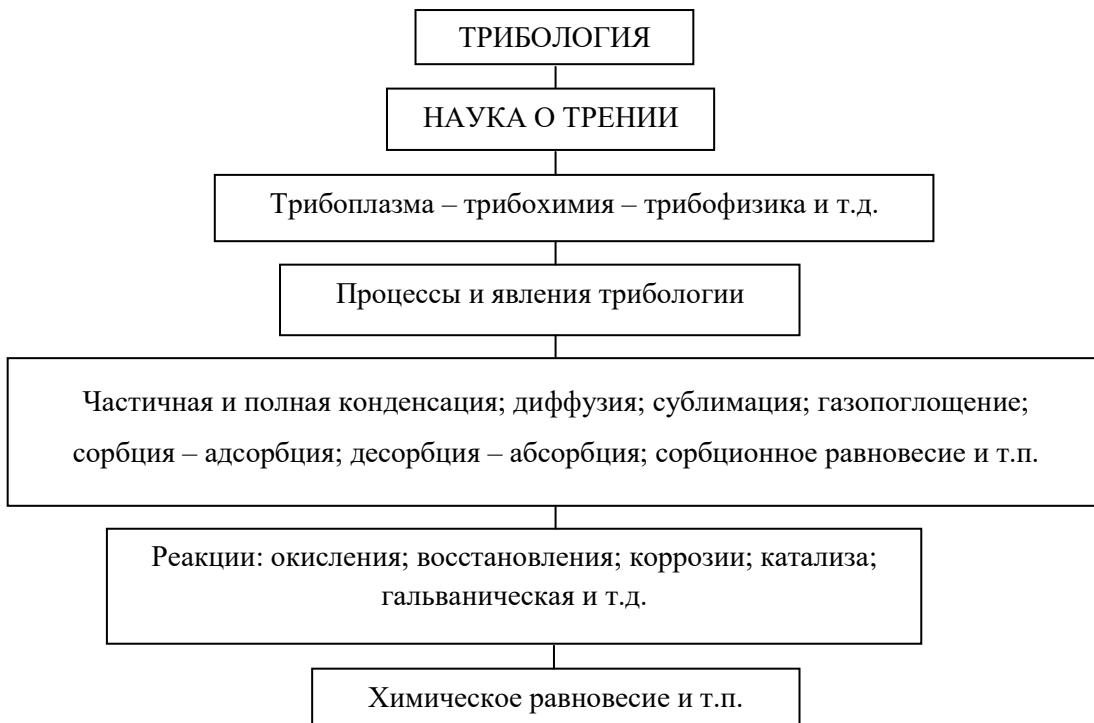
В табл. 2 приведено место трибохимии в трибологии пар трения тормозных устройств. Остановимся на некоторых из процессов.

Перейдем к оценке трибокинетической модели взаимодействия металличес-

ского фрикционного элемента при трении с газовой фазой.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, которые происходят в слое микронеровностей металлического фрикционного элемента под действием упругих или пластических деформаций при торможении в присутствии газовой среды (рис. 2).

Таблица 2 – Иерархические уровни трибологии
Table 2 – Hierarachic levels of tribology



На рис. 2 использованы следующие обозначения: I – химическая реакция $CO_2 + M \rightleftharpoons MO + CO$; II – химическая реакция $CO + M \rightleftharpoons C + MO$; III – каналы в микровыступах. Заштрихован поверхностный слой, нарушенный путем трения скольжения. Стрелкой вверх на границе

раздела обозначена трибодесорбция, стрелкой вниз – трибоабсорбция, двойные стрелки – трибодиффузия. Газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического фрикционного элемента путем диффузии, а потом адсорбируется.

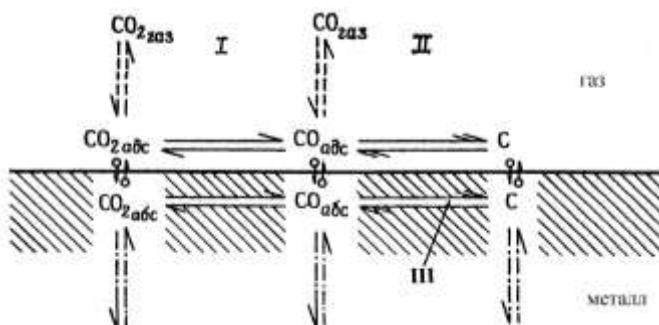


Рисунок 2 – Трибокинетическая модель трибосорбции и трибoreакции в системе CO_2 - металл: $CO_{2\text{gas}} - CO_2$ в газовой фазе; $CO_{2\text{ads}} - CO_2$ в адсорбированном состоянии; $CO_{2\text{abs}} - CO_2$ в абсорбированной форме, те же индексы для CO_2

Figure 2 - Tribokinetic model of tribosorption and triboreaction in the system CO_2 - metal: $CO_{2\text{gas}} - CO_2$ in the gas phase; $CO_{2\text{ads}} - CO_2$ in an adsorbed state; $CO_{2\text{abs}} - CO_2$ in absorbed form, same indices for CO_2

Трибоабсорбция происходит по точкам, которые попали под действие сил трения. В зависимости от условий контактирования пар трения тормозного устройства и их теплового состояния непосредственно в процессе торможения происходит трибоабсорбция в трибоплазме из газовой фазы наряду с трибохимической реакцией или с адсорбцией и реакцией газа на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента.

Кроме того, трибоадсорбированный газ адсорбируется металлом, и только после этого происходят с ним химические превращения. Наряду с этим трибоабсорбированный газ на микроучастках контактирования переносится в их приповерхностные слои (трибодиффузия), в которых химическая реакция в значительной степени определяется процессами трибосорбции и диффузии [7].

В случае, когда скорость трибосорбции и трибoreакции одного порядка, реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. При этом необходимо обратить внимание на то, что трибоиндукционные процессы очень часто существенно отличаются от соответствующих термоиндукционных процессов, и поэтому константы, которые характеризуют адсорбцию и диффузию при термоактивации, нельзя использовать для описания трибокинетических закономерностей.

Представление пар трения тормозных устройств в виде конденсатора позволяет констатировать, что дифференциальные емкости дают ответы на многие эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. Особенности структуры двой-

ного слоя представлены на рис. 3. На поверхности раздела могут присутствовать химические адсорбированные ионы, в данном случае анионы, которые имеют тот же знак, что и рабочая поверхность металлического фрикционного элемента тормозного устройства. Данные анионы дегидратированы, и через их центры проходит внутренняя плоскость Гельмгольца. Слой Штерна образовывается главным образом электростатически адсорбированными катионами, через центры которых проходит внешняя плоскость Гемгольца. При этом большая часть поверхности раздела занята молекулами воды. Кроме того, на сильно заряженной поверхности раздела концентрация адсорбированных ионов весьма мала, поскольку один ион приходится на $\sim 10 \text{ Å}^2$.

Представленная на рис. 3 схема очень наглядно все иллюстрирует для того случая, когда металлический фрикционный элемент находится в статике. Иначе все происходит в динамике. При торможении дискретное множество микроконтактного взаимодействия поверхностей "вращающийся металлический элемент – фрикционная накладка" при различных их тепловых состояниях будет вносить существенные изменения в рассмотренную ранее схему: переполяризация ионов и катионов, изменение положения плоскостей, когда внутренняя плоскость станет внешней, и наоборот, их существенным изменением усредненных электрических свойств; поверхность жидкости становится неоднородной в том понимании, что ее структуру нарушают адсорбированные частицы материалов накладки и другие составляющие вносят изменения в процессы и явления.

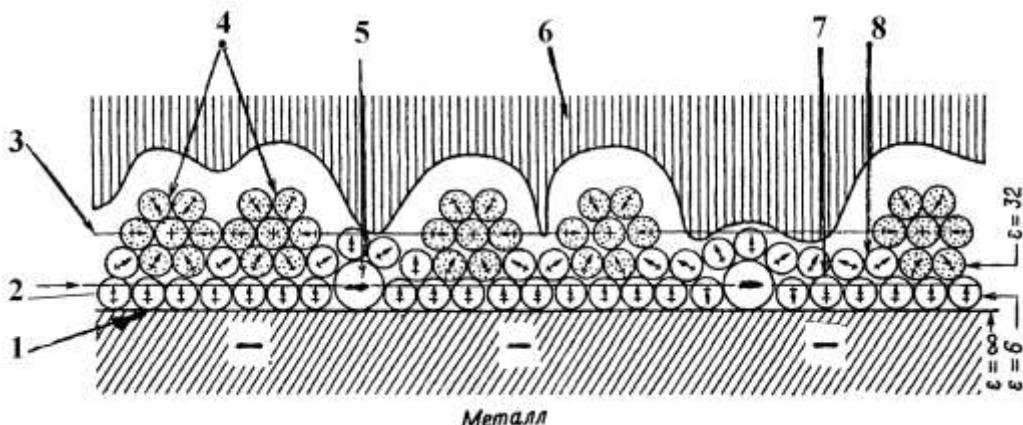


Рисунок 3 – Детальная модель двойного слоя в паре "металл-вода"; 1 – поверхность металла с потенциалом ϕ_M ; 2, 3 – плоскости Гемгольца и Гуи с потенциалами ϕ_1 и ϕ_2 ; 4 – сольватированные катионы; 5 – специфические адсорбированные анионы; 6 – нормальная структура воды ($\epsilon=78,5$); 7, 8 – слои воды: первый ($\epsilon=6$); второй ($\epsilon=32$); ϵ – диэлектрическая постоянная воды

Figure 3 – Detailed model of the double layer in the metal-water pair; 1 - metal-to-metal surface with the potential ϕ_M ; 2, 3 - Gemgolts's planes and Gui with potentials ϕ_1 and ϕ_2 ; 4 - salt-watated cations; 5 shows specific adsorbed anions; 6 - normal structure of water ($\epsilon=78.5$); 7, 8 - water layers: the first ($\epsilon = 6$); the second ($\epsilon = 32$); ϵ – a dielectric constant of water

Анализ процессов теплообмена в ободе тормозного барабана и во фрикционных накладках при взаимодействии их рабочих поверхностей с омывающими газовыми смесями, а также массопереноса от рабочих поверхностей накладок на рабочую поверхность обода барабана показал, что в интенсификации тепло- и массообменных процессов существенную роль играет уровень теплового состояния материалов приповерхностного слоя фрикционной накладки.

Различают следующие температурные перепады: между наружной поверхностью обода тормозного барабана и омывающим воздухом; между внутренней и наружной поверхностями обода тормозного барабана и омывающим воздухом; между рабочими поверхностями фрикционных накладок и омывающим воздухом (в интервале температур, ниже допустимой температуры); между рабочими поверхностями и уровнями приповерхностных слоев фрикционных накладок; между рабочими

поверхностями фрикционных накладок и омывающей газовой смесью; между внутренней поверхностью обода тормозного барабана и газовой смесью, омывающей внутреннюю и наружную поверхности обода.

Процессы и явления, происходящие в парах трения барабанно-колодочного тормоза транспортного средства, реализуются посредством теплопередачи.

На рис. 4 а, б использованы следующие обозначения: t_P , t_{ϕ_P} , t_{0B} , $t_{O.C.}$ – температуры: рабочей поверхности обода тормозного барабана; рабочей поверхности фрикционной накладки; обода тормозного барабана; окружающей среды.

При этом элементам фрикционного узла тормоза отвечают соответствующие координаты (x).

В интервале допустимых температур для материалов фрикционной накладки имеет место фазовый переход 1-го рода его компонентов.

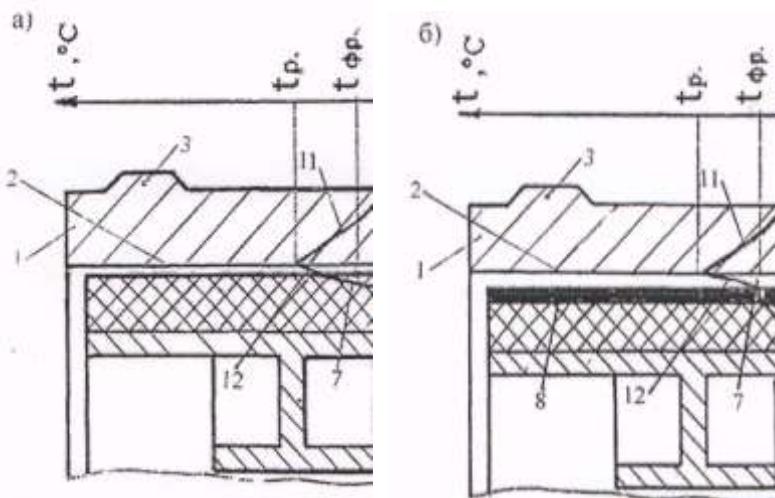


Рисунок 4 а, б – Теплопередача через элементы пар трения (а - до, б - после допустимой температуры материалов фрикционной накладки) барабанно-колодочного тормоза автомобиля: 1 - тормозной барабан; 2, 3, 4 - обод, подкрепляющее кольцо, боковая стенка барабана; 5 - фрикционная накладка; 6 - тормозная колодка; 7 - зазор между элементами трения; 8 - приповерхностный слой накладки; 9, 10, 11, 12,13 - закономерности изменения температур по толщине: приповерхностного слоя накладки, собственно накладки, обода тормозного барабана и слоя воздуха, омывающего его внутреннюю и наружную поверхности

Figure 4 a, b - Heat transfer through the elements of friction pairs (a - up to, b - after the permissible temperature of the friction lining materials) of the drum-shoe brake of the car: 1 - brake drum; 2, 3, 4 - rim, sub-fastening ring, side wall of drum; 5 - friction lining; 6 - brake shoe; 7 shows the clearance between the friction elements; 8 shows the near-surface layer of the patch; 9, 10, 11, 12,13 - patterns of temperature change in thickness: near-surface layer of lining, actual lining, brake drum rim and air layer washing its inner and outer surfaces

Рассмотрим процесс, который имеет место между парами трения барабанно-колодочного тормоза при условии, что поверхностный слой фрикционной накладки достиг температуры выше допустимой.

Вероятными источниками поступления окружающей среды в контактную зону пар трения тормоза является контактный зазор и открытые участки поверхности трения. На них происходит адсорбирование молекул газа (адсорбционный эффект) при неполном взаимном перекрытии пар трения.

При этом основной средой является омывающий воздух между парами трения тормоза. В то же время приповерхностный слой накладок тормозных колодок является либо источником компонентов газовой

среды вследствие протекания процессов испарения, сублимации, десорбции, и т.п., либо поверхностью их стоков при конденсации, адсорбции, абсорбции и т.п. По отношению к газовым смесям в целом поверхности раздела играют роль полупроницаемых перегородок. Компоненты непрерывно диффундируют в направлении, нормальном к рабочей поверхности обода тормозного барабана. Этот диффузионный поток компонентов сопровождается встречной диффузией основной среды, т.е. омывающим воздухом.

Но с другой стороны, совершенно очевидно, что основная среда, для которой поверхности пар трения непроницаемы, не должна перемещаться в направлении, нормальном к рабочей поверхности обода

тормозного барабана. Эти два взаимно противоположных требования удовлетворяются тем, что возникает течение смеси, направленное навстречу диффузионному потоку основной среды и компенсирующее его (эффект Стефана).

Итак, на явления диффузионной природы накладывается процесс, имеющий характер конвективного переноса вещества. Нейтрализуя диффузионный перенос основной среды, конвективный поток смеси, очевидно, усиливает перенос составляющих компонентов. Общая картина перераспределения газовой смеси в объеме зазора между парами трения тормоза изменяется, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 3.

Фрикционные материалы для тормозных устройств должны исследоваться с позиций физико-химической механики тре-

ния в режиме торможения с применением термогравиметрического и дифференциально-термического методов анализа [1].

Результаты указанных исследований для образца из материала ФК-24А представлены на рис. 5. Установлено, что деструкция образца ФК-24А начинается при температуре 300 °C. Рассчитанная энергия активации разложения образца ФК-24А составила 85,5. Доказано, что образец распадается в течение 15 минут при поддержании его температуры 400 °C.

Скорость уменьшения его массы при дальнейшем увеличении температуры возрастает. Необходимо отметить, что режимы исследования материала ФК-24А на термостойкость в виде образца не всегда отвечают реальным условиям работы приповерхностных слоев фрикционных накладок в парах трения тормозных устройств.

Таблица 3 – Процентное соотношение компонентов газовой смеси, образованной в межконтактном пространстве пары трения

Table 3 - Percentage of components of the gas mixture formed in the contact space of the friction pair

Номер пробы	Марка компонента	Температура, °C	Содержание газа, мас. доля, %						
			H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	ΣC _n H _m	другие газы ***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	Остальное
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	

Примечание:

*Наличие следов указанных газов.

**Отбор проб осуществлялся из четырех зон (точек) одновременно.

***Под другими газами подразумевается: Ar, Ne, He, Kr, N₂O, Xe, O₂, Rn [9].

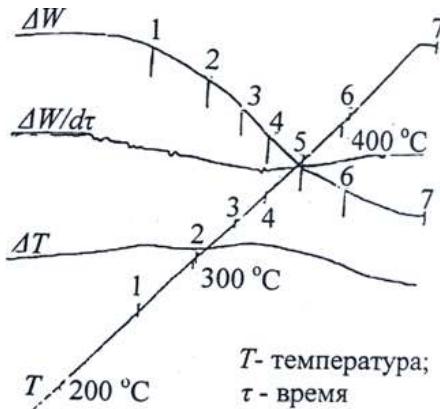


Рисунок 5 – Дериватограмма образца ФК-24А: ΔW -потери массы, определяемые по термогравиметрической кривой; $dW/d\tau$ - скорость изменения (дифференциально-термогравиметрическая кривая); ΔT -дифференциаль-термическая кривая

Figure 5 - Derivatogram of sample FK-24A: ΔW -weight loss determined by thermogravimetric curve; $dW/d\tau$ - rate of change (differential-thermogravimetric curve); ΔT -differential and thermal curve

Деструкция фрикционных материалов сопровождается интенсивным дымлением, а затем образованием жидких фракций в порах их поверхностного слоя. При этом молекулы адсорбента весьма прочно удерживаются в микропорах поверхностного слоя материала вследствие того, что они окружены большим количеством атомов углерода.

Адсорбция газовой фазы – это процесс конденсации, который происходит в условиях, когда энергия адсорбции оказывается достаточной для конденсации пара. Сконденсировавшийся пар остается в пористой структуре углерода в виде жидкости.

Кроме того, экспериментальными исследованиями установлено [8], что состав газовой среды оказывает значительное влияние на процессы электротермомеханического трения и изнашивания. При работе в газовых средах, содержащих в своем составе O_2 , на пятнах контактов микровыступ-

пов происходит интенсивное образование окисных пленок, обеспечивающих работу фрикционного сопряжения в режиме окислительного износа, что исключает скваживание.

Электрического с магнитным

При эксплуатации ленточно-колодочного тормоза важной практической задачей является ограничение температуры обода шкива при нагревании энергией электромагнитного поля. Определим ее и используем в дальнейшем это значение для оценки функции источника в уравнении теплопроводности.

Запишем уравнение Максвелла для однородной среды, которым является металлический обод шкива, при условии, что ток смещения в нем является незначительным в сравнении с током проводимости.

Ток смещения - это условное название локализованного переменного электрического поля, которое сопровождается появлением магнитного поля. В отличие от других токов (проводимости и конвекции) он не создается упорядоченным движением зарядов, поэтому при отсутствии диэлектрика (и его переполяризации) он не способствует нагреванию обода шкива.

Вместо тока проводимости (j) и магнитной индукции (B) подставим их значения из таких уравнений

$$j = \sigma E; \quad B = \mu H, \quad (15)$$

где σ - выработанная энтропия в единице объема; μ - магнитная проницаемость; E , H - напряженность электрического и магнитного полей

После этого получим систему уравнений:

$$\operatorname{rot} H = \sigma E; \quad (16)$$

$$\operatorname{div} H = 0; \quad (17)$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial \tau}; \quad (18)$$

$$\operatorname{div} E = 0; \quad (19)$$

Выполнив операцию rot к обоим частям уравнения и учтя формулу векторного анализа

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} H = \operatorname{grad} \operatorname{div} H - \Delta H,$$

получим для случая $\operatorname{div} H = 0$:

$$\Delta H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial \tau}, \quad (20)$$

где τ - время, в течение которого происходит процесс.

Уравнение (20) относится к классу параболических уравнений, поэтому к нему можно применять все методы математической физики [9, 10]. В связи с тем, что векторы B , D , H , E для рассматриваемых задач связаны с гармонически переменным внешним полем (нагревание происходит синусоидальным током), их проще представить комплексным числом

$$\overset{\circ}{H} = H_a \exp(i\omega\tau),$$

где H_a – амплитуда вектора; ω - круговая частота. Тогда получаем:

$$\frac{\overset{\circ}{H}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} [H_a \exp(i\omega\tau)] = i\omega \overset{\circ}{H}, \quad (21)$$

или

$$\overset{\circ}{\Delta H} = i\mu \sigma \omega \overset{\circ}{H}. \quad (22)$$

Направляя вектор $\overset{\circ}{H}$ перпендикулярно плоскости xOy , из (22) имеем:

$$\frac{\partial^2 \overset{\circ}{H}}{\partial z^2} = i\mu \sigma \overset{\circ}{H} = k^2 \overset{\circ}{H}. \quad (23)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\overset{\circ}{H} = \overset{\circ}{A} \exp(-kz) + \overset{\circ}{B} \exp(kz). \quad (24)$$

Связь между электрическим и магнитным полем описывается с помощью выражения:

$$\overset{\circ}{\operatorname{rot} H} = \sigma \overset{\circ}{E}. \quad (25)$$

После подстановки в (25) выражение для вектора электрического поля приобретает вид:

$$E = I_x \frac{k}{\sigma} \left[\overset{\circ}{A} \exp(-kz) + \overset{\circ}{B} \exp(kz) \right], \quad (26)$$

где I_x - единичный орт.

Первый член выражения (26) описывает затухание электрической волны электромагнитного поля, которая падает на внешнюю поверхность обода тормозного шкива, второй - отраженную волну. Для полуограниченного участка шкива при $B = 0$ получаем:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{H} &= \overset{\circ}{A} \exp(-kz); \\ \overset{\circ}{E} &= I_x \frac{k}{\sigma} \overset{\circ}{A} \exp(-kz). \end{aligned} \quad (27)$$

Постоянную интегрирования $\overset{\circ}{A}$ определяем из граничных условий: на наружной поверхности обода шкива ($z = 0$) напряженность магнитного поля в воздухе $\overset{\circ}{H} = \overset{\circ}{H}_0$. Указанная величина не изменится при переходе через границу «воздух - металл», т.е. при $z = 0$ $\overset{\circ}{H} = \overset{\circ}{H}_0$ в металле.

Таким образом

$$\overset{\circ}{H} = \overset{\circ}{H}_0 \exp(-kz). \quad (28)$$

Для практических расчетов электрических и магнитных полей, которые возникают в ободе тормозного шкива, часто используется величина δ , которую называют «глубиной проникновения поля»:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \quad (29)$$

На глубине δ обода шкива амплитуда колебаний полей уменьшится в e раз, т.е.

$$H_\delta = H_0 e^{-1}; \quad (30)$$

$$E_\delta = E_0 e^{-1}; \quad (31)$$

где H_0 , E_0 - напряженность магнитного и электрического полей.

В полученных зависимостях (30), (31) учтем то, что коэффициент затухания волн $k = \sqrt{i\omega\mu\delta} = 1 + i/(\delta)$,

тогда

$$\dot{H} = H_0 \exp\left(-\frac{1+i}{\delta}\right); \quad (32)$$

$$\dot{E} = iH_0 \frac{1+i}{\delta} \exp\left(-\frac{1+i}{\delta} z\right), \quad (33)$$

где \dot{H} , \dot{E} - текущие величины магнитного и электрического полей при наличии i -го количества слоев обода шкива с переменной координатой z_i в каждом из полей.

В дальнейшем определяем фазы H и E . Из выражений (32) и (33) после несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \varphi_H &= \omega r - \frac{z}{\delta}; & \varphi_E &= \omega r - \frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4}; \\ \varphi_H - \varphi_E &= \frac{\pi}{4}. \end{aligned} \quad (34)$$

Таким образом, для плоской волны в ободе шкива в любой момент времени в точке z фаза вектора электрического поля опережает фазу вектора магнитного поля на $1/8$ периода. На рис. 6 приведены графики мгновенных значений напряженности электрического E и магнитного H полей в металле обода шкива. Во времени указанные векторы меняются синусоидально, а в пространстве их изменение носит апериодический характер и быстро за-

тухает в направлении распространения электромагнитного поля.

Величина фазовой скорости распространения электромагнитного поля в ободе шкива

$$v_\phi = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}. \quad (35)$$

При этом длина волны равна:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}. \quad (36)$$

Из полученных зависимостей для фазовой скорости (35) и длины волны (36) в металле обода шкива видно, что они зависят от параметров μ , σ и от круговой частоты ω .

В табл. 4 приведены данные λ , v_ϕ и δ для стали (материала обода шкива).

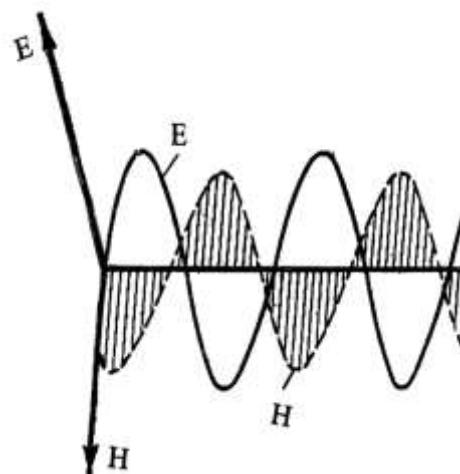


Рисунок 6 – Плоская электромагнитная волна в металлическом ободе тормозного шкива со стороны его внешней поверхности

Figure 6 - Flat electromagnetic wave in the metal rim of the brake pulley on the side of its external surface

Таблица 4 – Характеристики плоской электромагнитной волны и глубины ее проникновения в тело обода шкива при индукционном нагревании

Table 4 - Characteristics of the flat electromagnetic wave and its penetration depth into the body of the pulley rim during induction heating

Частота, $\lambda, \text{с}^{-1}$	Длина волны (в см) для стали при:		Фазовая скорость (v_ϕ , см/с) в стали при:		Глубина проникновения (δ , мм) в сталь при:	
	$t = 20^\circ\text{C}$; $\mu = 10$	$t = 800^\circ\text{C}$; $\mu = 1,0$	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 800^\circ\text{C}$	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 800^\circ\text{C}$
50	4,46	44,6	$2,23 \cdot 10^2$	$2,23 \cdot 10^3$	0,71	7,11
$2,5 \cdot 10^3$	0,63	6,33	$1,55 \cdot 10^3$	$1,55 \cdot 10^4$	0,1	1,0
10^4	0,316	3,16	$3,16 \cdot 10^3$	$3,16 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,5
10^6	$3,16 \cdot 10^{-2}$	0,316	$3,16 \cdot 10^4$	$3,16 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Проанализируем полученные расчетные данные.

С увеличением частоты λ электромагнитной волны глубина ее проникновения δ в сталь уменьшается. Расчеты выполнены при постоянной величине магнитной проницаемости ($\mu = \text{const}$). Однако отметим, что магнитная проницаемость $\mu = f(\text{H})$ является величиной переменной, поэтому полученные данные фактически являются приближенными.

Заключение

Использование комбинации составляющих физических принципов применительно к фрикционным парам трения тормозных устройств позволили установить закономерности изменения электрических и тепловых полей при контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях.

Теоретические исследования нестационарных физико-химических процессов в контактном зазоре между микровыступами металлополимерных пар трения тор-

мозных устройств при условии, что $K_{\text{бз}} \leq 1$ (коэффициент взаимного перекрытия пар трения), базируется на использовании основных положений теории: нестационарной диффузии; газовой динамики; химической кинетики и электротермомеханического трения. При этом маловажная роль отводится процессам нестационарной доставки и потребления активного компонента среды в межконтактный зазор микровыступов металлополимерных пар трения. Общую роль занимают адсорбционные процессы, происходящие на металлическом фрикционном элементе.

Для плоской электромагнитной волны, попадающей на внешнюю поверхность обода тормозного шкива, в любой момент времени в заданной точке фаза вектора электрического поля опережает фазу вектора магнитного поля на $1/8$ периода, что в дальнейшем позволило оценить характеристики плоской электромагнитной и глубины ее проникновения в тело обода шкива при индукторном нагревании.

Установлено общее количество тепловой энергии, которая распространяется в теле обода шкива при его индукторном нагревании, позволившая сделать сравни-

тельный анализ соотношений напряжений магнитных и электрических полей и доказать, что соотношение $\left(\frac{\circ}{E} / \frac{\circ}{E_0}\right)$ является почти квазистабильным в интервале температур ниже точки Кюри (780°C). Таким образом, внешняя поверхность обода шки-

ва работает в зоне ферромагнитных свойств его материала.

Проанализированы закономерности изменения температур на внешней поверхности и внутри приповерхностного слоя обода тормозного шкива во времени при индукторном нагревании.

REFERENCES

1. Proektnyj i proverochnyj raschet frikcionnyh uzlov lentochno-kolodochnyh tormozov transportnyh sredstv / A.Kh. Janahmadov, D.A. Volchenko, D.Yu. Zhuravlev [i dr.]. Standart. Baku: «Apostroff», 2016. – 311 s. (in Russian)
2. Volchenko A.I. Teplovoj raschet tormoznyh ustrojstv. Lvov: Vishcha shkola, 1987. – 136 s. (in Ukrainian)
3. Genbom B.B., Gudz G.S., Eremenko P.I. O vliyanii konstruktivnyh faktorov na temperaturnyj rezhim tormoznyh mekhanizmov. Avtomobilnaya promyshlennost. 1976. №1. S. 26 – 28. (in Russian)
4. 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. Vol.13, No 2, 2021, pp. 48-57 (in Russian)
5. Muchnik G.F., Rubashov I.B. Metody teorii teploobmena. Teplovoe izluchenie. M.: Vysshaya shkola, 1974. – 272 s. (in Ukrainian)
6. Kozdoba L.A. Elektricheskoe modelirovanie yavlenij teplo- i massoperenos. M.: Energiya, 1972. – 296 s. (in Russian)
7. Janahmadov A.Kh. Sinergetika i fraktaly v tribologii / A.Kh. Janahmadov, O.A. Dyshin, M.Ya. Javadov. Baku: Apostroff, 2014. - 504 s. (in English)
8. Sopronyuk M.P. Dmagnostika materialov i sred. Energeticheskie poverhnosti sloev / P.M. Sopronyuk, V.M. Yuzevych. – Lvov: FMI im. G. V. Karpenko NAN Ukrayiny, iz-vo «SPOLOM». 2005. – 292 s. (in Ukrainian)
9. Abramovich I.G., Levin V.I. Uravnenie matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1990. – 286 s. (in Russian)
10. Nensis E.I. Metody matematicheskoy fiziki. M.: Prosveshchenie, 1987. – 200 s. (in Russian)

Application of the Finite Element Method in the Calculation of Shells of Revolution

A.N. Gurbanov, I.Z. Sardarova, L.A. Aliyeva

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

For correspondence:

Gurbanov Abdulaga / e-mail: qabdulaga@mail.ru

Abstract

The paper describes an algorithm for calculating structurally orthotropic shells of rotation with an arbitrary shape of the meridian and an arbitrary law of change in the rigidity of the shell along the meridian. In this case, a number of restrictions are imposed on the law of change in the shell stiffness. Under the action of an axisymmetric load on the shell, the method of dividing the shell into a system of curvilinear rods lying on elastic supports and an elastic foundation turned out to be effective. At the same time, the limitations inherent in these algorithms do not provide a solution to many problems of interest to a design engineer. In this regard, the finite element method, which was previously successfully applied in the study of unsupported shells, is promising.

Keywords: rotation shell, polynomial, finite elements, center of gravity, vertex elements, load vector, displacement vector.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_48_54

Received 02.08.2021
Revised 18.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Gurbanov A.N., Sardarova I.Z., Aliyeva L.A.

[Application of the finite element method in the calculation of shells of revolution]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 48-54 (in Russian)

Fırlanma üzlərinin hesablanmasında son elementlərin tətbiqi üsulu

Ə.N. Qurbanov, İ.Z. Sərdarova, L.A. Əliyeva

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

Yazışma üçün:

Qurbanov Əbdulağa / e-mail: qabdulaga@mail.ru

Xülasə

Məqalədə meridianın sərbəst forması və meridian boyunca qabığın sərtliyinin sərbəst dəyişməsi ilə konstruktiv-ortotrop fırnanma qabıqlarının hesablanması alqoritmi təsvir edilmişdir. Bununla yanaşı, qabığın sərtliyində dəyişiklik qanununa bir sıra məhdudiyyətlər qoyulur. Qabığa asimmetrik yüksək təsir edərkən möhkəm dayaqlarda və möhkəm əsasda yatan əyri xətti çubuqlar sisteminə qabığın parçalanmasının qəbulu səmərəli oldu. Eyni zamanda, bu alqoritmələrə xas məhdudiyyətlər layihə mühəndisi üçün maraq doğuran bir çox problemlərin həllini əldə etməyə imkan vermir. Bu baxımdan, son elementlərin tətbiqi metodu çox perspektivlidir, əvvəllər möhkəmləndirilməmiş qabıqların tədqiqində müvəffəqiyyətlə tətbiq olunub.

Açar sözlər: fırnanma, polinom, son elementlər, ağırlıq mərkəzi, zirvə elementləri, yüksək vektoru, hərəkət vektoru.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_48_54

УДК: 681.534.1

Применение метода конечных элементов при расчете оболочек вращения

А.Н. Гурбанов, И.З. Сардарова, Л.А. Алиева

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

Для переписки:

Гурбанов Абдулага / e-mail: qabdulaga@mail.ru

Аннотация

В работе описан алгоритм расчета конструктивно-ортотропных оболочек вращения с произвольной формой меридиана и произвольным законом изменения жесткости оболочки вдоль меридиана. При этом на закон изменения жесткости оболочки накладывается ряд ограничений. При действии на оболочку осесимметричной нагрузки эффективным оказался прием расчленения оболочки на систему криволинейных стержней, лежащих на упругих опорах и упругом основании. В то же время присущие этим алгоритмам ограничения не дают решения многих задач, представляющих интерес для инженера-проектировщика. В этом отношении перспективным является метод конечных элементов, который ранее был успешно применен при исследовании неподкрепленных оболочек.

Ключевые слова: оболочка вращения, полином, конечные элементы, центр тяжести, вершинные элементы, вектор нагрузок, вектор перемещений.

Введение

При расчете оболочки вращения разбивается на несколько криволинейных конечных элементов.

Каждый из элементов представляет собой оболочку вращения, вырезанную из исходной двумя плоскостями, перпендикулярными осям оболочки [1-3].

Обозначив через $2l$ длину элемента в направлении меридиана, совместим с серединой дуги координатную плоскость r, φ системы координат r, φ, Z , в которых будем задавать положение точки серединной поверхности оболочки [4].

Введя далее безразмерный параметр $\eta = \frac{S}{l}$, где S – длина дуги, отсчитываемая вдоль меридиана от середины точки, определим r и z через безразмерный параметр η .

Для этого будем задавать r полиномом четвертого порядка:

$$r = r_0 + r_{1\eta} + r_2\eta^2 + r_3\eta^3 + r_4\eta^4, \quad (1)$$

в котором постоянные r_2 определяются из условий:

$$\left. \begin{array}{l} r = r_* \\ r' = r'_* \end{array} \right\} \eta = \pm 1; r = r_*; \eta = 0 \quad (2)$$

где r_* и r'_* – точное значение радиуса и его первой производной по координате η на узловой ($\eta = \pm 1$) или центральной ($\eta = 0$).

При решении задачи устойчивости пластины с применением метода конечных элементов удобно идеализировать конструкцию в виде треугольного элемента. Этот элемент имеет двадцать степеней свободы и позволяет обеспечить в узлах непрерывность как поля перемещений, так и поля напряжений.

Постановка задачи

Опишем процедуру решения задачи с использованием такого элемента.

Обозначим через u и ϑ перемещения в направлении осей x и y для плоско-напряженного элемента. В качестве неизвестных, подлежащих определению, примем перемещения и их первые производные в узловых точках по направлениям x и y и перемещения центра тяжести элемента u_c и ϑ_c [4-8].

Координаты центра тяжести x_c и y_c определяются по формулам:

$$x_c = \frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3);$$

$$y_c = \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3);$$

Соответственно выбранному числу (независимых неизвестных узловых перемещений элемента) будем задавать поле перемещений внутри элемента полным кубическим полиномом:

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + \\ &+ a_7x^2 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3; \\ \vartheta &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}x^2 + a_{15}xy + \\ &+ a_{16}y^2 + a_{17}x^3 + a_{18}x^2y + a_{19}xy^2 + a_{20}y^3 \end{aligned}$$

При этом

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad u_y = \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \vartheta_x = \frac{\partial \vartheta}{\partial x}, \quad \vartheta_y = \frac{\partial \vartheta}{\partial y}.$$

Методы решения

Соотношение между перемещениями в вершинах элемента и постоянными запишем в матричной форме в виде:

$$\{U_i\} = [M(x_i, y_i)]\{a\} \quad (3)$$

$$\text{где } \{U_i\} = \begin{bmatrix} U \\ U_x \\ U_y \\ V \\ V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \{a\} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{19} \\ a_{20} \end{bmatrix},$$

$$[M(x, y)] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2x & y & 0 & 3x^2 & 2xy & y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & x^2 & 2x & 3y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2x & y & 0 & 3x^2 & 2xy & y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & x^2 & 2xy^3 & y^2 \end{bmatrix}$$

Соответственно, полный вектор перемещений узлов

$$\{U_n\} = [A]\{a\}, \quad (4)$$

где

$$[U_n] = \begin{bmatrix} \{U_{1n}\} \\ \{U_{2n}\} \\ \{U_{3n}\} \\ \{U_{cn}\} \end{bmatrix}, \{U_{cn}\} = \begin{bmatrix} U_c \\ \vartheta_c \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} [M(x_1, y_1)] \\ [M(x_2, y_2)] \\ [M(x_3, y_3)] \\ [F(x_c, y_c)] \end{bmatrix}$$

Подматрица, используемая для определения вектора перемещений центра тяжести элемента, имеет следующую структуру:

$$[F(x_c, y_c)] = \begin{bmatrix} 1 & x_c & y_c & x^2 & x_c y_c & y_c^2 & x_c^3 & x_c^2 y_c & x_c^2 y & x_c y_c^2 & y_c^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_c & y_c & x_c^2 & x_c y_c & y_c^2 & x_c^3 & x_c^2 y_c & x_c^2 y_c & y_c^3 \end{bmatrix}$$

Матричное уравнение (4) позволяет выразить неопределенные коэффициенты a через перемещения узлов и центра тяжести

$$\{a\} = [A]^{-1}\{U_n\}, \quad (5)$$

Соответственно полный вектор перемещений в произвольной точке элемента

$$\{u\} = [M(x, y)][A]^{-1}\{U_n\}. \quad (6)$$

Выражения для компонент деформации и плосконапряженного элемента

$$E_x = \frac{\partial u}{\partial x}, E_y = \frac{\partial \vartheta}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

Используя уравнение (6), матрицу деформаций можно записать в виде:

$$\{E\} = [B][A]^{-1}\{U_n\}, \{E\} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2xy & y & 0 & 3x^2 & 2xy & y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & x^2 & 2xy & 3y^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & 0 & 2xy & 3y^2 & 0 & 1 & 0 & 2x & y & 0 & 3x^2 & 2xy & y^2 & 0 \end{bmatrix}$$

Соотношение между деформациями и напряжениями

$$\{\sigma\} = [\chi]\{E\}, \quad (8)$$

где $[\chi]$ - матрица, имеющая следующую структуру:

$$[\chi] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Окончательно с учетом выражения для деформации (7) матрица напряжений

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \text{ определяется уравнением:}$$

$$\{\sigma\} = [\chi][B][A]^{-1}\{U_n\} \quad (9)$$

Матрица жесткости элемента. Для вывода матрицы жесткости элемента воспользуемся принципом равенства работы узловых сил на потенциальной энергии элемента:

$$\frac{1}{2}\{U_n\}'[K]\{U_n\} = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}'\{\sigma\} dV, \quad (10)$$

где ε – относительная деформация.

Интегрирование проводится по всему объему элемента. Подставляя в уравнение (10) выражения (7) и (8), получим выражения для усилий в узлах

$$\begin{aligned} \{s\} &= [K]\{U_n\} = \\ &= [A]^{-1t} \int_V [B]^t [\chi][B] dV [A]^{-1}\{U_n\}, \end{aligned} \quad (11)$$

Отсюда матрица жесткости определяется соотношением:

$$[K] = [A]^{-1t} \int_V [B]^t [\chi][B] dV [A]^{-1} \quad (12)$$

В общем случае

$$dV = t(x, y) dx dy, \quad \text{где } t(x, y) - \text{толщина элемента.}$$

Преобразование матрицы жесткости.

Матрица жесткости может быть непосредственно применен для расчета конструкции, однако, поскольку центральные перемещения U_c и V_c не участвуют в сопряжении, целесообразно понизить размерность матрицы жесткости. Матрицы $[k]$, $\{s\}$ и $\{U\}$ и условия равенства внешних сил во внутренних узлах можно записать в блочной форме следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \{S_v\} \\ \{S_c\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{vv}] & [K_{vc}] \\ [K_{cv}] & [K_{cc}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_n\} \\ \{U_c\} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где индексы v и c относятся соответственно к перемещениям или силам в вершинах или центре. Из выражений (13) после перемножения блоков получим два матричных уравнения:

$$\{S_v\} = [K_{vv}]\{U_v\} + [K_{vc}]\{U_c\}; \quad (14)$$

$$\{S_c\} = [K_{cv}]\{U_v\} + [K_{cc}]\{U_c\}. \quad (15)$$

Исключив далее $\{U_c\}$ из уравнений (14) и (15), получим:

$$\begin{aligned} \{S_v\} - [K_{vc}] \{K_{cc}\}^{-1} \{S_c\} = \\ = \{[K_{vv}] - [K_{vv}] [K_{cc}]^{-1} [K_{cv}]\} \{U_v\} \end{aligned} \quad (16)$$

или

$$\{S_r\} = [\bar{K}] \{U_v\} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \{S_r\} &= \{S_v\} - [K_{vc}] \{K_{cc}\}^{-1} \{S_c\}, \\ [K] &= [K_{vv}] - [K_{vv}] [K_{cc}]^{-1} [K_{cv}] \end{aligned} \quad (18)$$

Вектор эквивалентных нагрузок может быть выведен из принципа равенства виртуальных работ приложенных и узловых нагрузок.

Полагая, что $\{G\}$ - матрица эквивалентной нагрузки, работу, совершенную узловыми силами $\{G\}$, на возможных перемещениях $\{\delta U_n\}$ можно записать в виде

$$\delta W_G = \{\delta U_n\}^t \{G\} \quad (19)$$

Полагаем далее, что

$$\{F\} = \begin{bmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \\ F_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

матрица-столбец приложенных объемных сил, запишем виртуальную работу этих сил на возможных перемещениях $\{\delta U_n\}$:

$$\delta W = \int_V \{\delta U(x, y)\}^t \{F\} dV \quad (20)$$

Учитывая полученное выше выражение (6), получаем

$$\delta W = \{\delta U_n\}^t ([A]^{-1t} \int_V [M(x, y)]^t \{F\} dV) \quad (21)$$

Приравняв δW_g и δW из уравнений (19) и (21), найдем матрицу-столбец эквивалентных нагрузок:

$$\{G\} = [A]^{-1t} \int_S [M(x, y)]^t \{F\} dV \quad (22)$$

Матрица-столбец эквивалентных нагрузок имеет размер 20x1.

Аналогично для вектора поверхностных сил:

$$\{P\} = [A]^{-1t} \int_S [M(x, y)]^t \{L\} dS \quad (23)$$

Для сил, приложенных на границах элемента:

$$\{\psi\} = [A]^{-1t} \int_L [M(x, y)]^t \{Q\} dL \quad (24)$$

где $\{Q\}$ – матрица-столбец сил, приложенных на границе элемента, \int_L означает интегрирование по контуру.

Поскольку при расчете конструкции вектор перемещений элемента $\{U_n\}$ заменим вектором $\{U_v\}$, включающим только перемещения в узлах, векторы-столбцы приведенных нагрузок должны быть преобразованы к новому вектору по формулам:

$$\{G\} = \{G_v\} - [K_v] [K_{cc}]^{-1} \{G_c\}$$

$$\{P_r\} = \{P_v\} - [K_{vc}] [K_{cc}]^{-1} \{P_c\}$$

$$\{\psi\} = \{\psi_v\} - [K_{vc}] [K_{cc}]^{-1} \{\psi_c\}$$

После того как определены матрицы жесткости $[k_g] = [k_1][k_2] \dots [k_s]$, чтобы получить матрицу жесткостей $[k]$ для полной идеализированной конструкции, целесооб-

разно использовать следующее преобразование: $[k] = [a]^T [\tilde{k}] [a]$

где $[a]$ – матрица, выражающая соотношение между независимыми перемещениями, соответствующими кинетическим степеням свободы отдельных элементов (узловыми перемещениями) и независимыми перемещениями, принятыми для конструкции. Подматрицы $[a_g]$ матрицы $[a]$ формируются так, чтобы выполнялось условие:

$$\{U_g\} = [a_g]\{U\}$$

Заключение

Предложенный подход позволяет включать геометрические данные элемента в матрицу $[k_g]$, а матрица $[a]$ содержит информацию, указывающую, по какому адресу необходимо доставить элементы подматрицы $[k_g]$ при формировании матрицы $[a]$. Данный способ идентичен в принципе способу сложения коэффициентов жесткости, но более удобен для реализации на ПК.

REFERENCES

1. **Edelen D.G.B.** On a closure of the governing equations of defect mechanics and the resulting theory of the plastic state. *Int. J. Eng. Sci.* 1979. Vol.17. Pp. 441-464 (*in English*)
2. **Engheta N., Ziolkowski R.** (ads). Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, N.-Y.: John Wiley and Sons, 2006 (*in English*)
3. **Hümbətov R.T., İbrahimov B.Q., İbrahimov R.F.** Telekomunikasiya sistemlərində ötürulən informasiyanın bir kriptoqrifik muhafizə üsulu haqqında. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, № 2. 2018. C. 72-79 (*in Azerbaijani*)
4. **Green A., Adkins D.** Large elastic informations and nonlinear mechanics of a continues medium, Moscow: Peace, 1965, 455 p. (*in English*)
5. **Hao Y., Mitra R.Y.** FTTD Modeling of Metamaterials. Theory and Applications. Artech House Publishers, 2009. 379 p. (*in English*)
6. **Gurbanov A.N.** Razrabotka matematicheskikh modelej osushki prirodnogo gaza pri podgotovke k transportu. *Vestnik Azerbajdzhanskoy inzhenernoy akademii*. 2014, T. 6, № 2, s. 89-96 (*in Russian*)
7. **Martanova G.V.** Variation method for calculating rubber-metal elastic elements by the determination of integral and normal loads, International Conference on plastics and rubber. Pre-printed reports, Section W.T.I. Kiev, 1978, 12 p. (*in English*)
8. **Yoshida S.** Consideration on fracture of solid-state materials. *Phys. lett. A*.200. Vol.270. Pp. 320-325 (*in English*)

SEM Investigation of Microlayer Formation and Study of Wear Mechanism in Friction Composites

F.F. Yusubov

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

For correspondence:

Yusubov Fikrat / e-mail: fikrattyusub@gmail.com

Abstract

The paper is devoted to the study of wear surfaces of friction composite materials obtained by powder metallurgy. A scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (XRD) is used to study changes in contact surfaces under various friction conditions and the nature of the microlayer. The results show that oxidation wear is characteristic of almost all stages. The sequence of formation of frictional microlayers is also determined.

Keywords: composites, friction, wear, degradation, oxidation, adhesion, microlayers.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_55_63

Received 08.02.2022
Revised 20.06.2022
Accepted 25.06.2022

For citation:

Yusubov F.F.

[SEM investigation of microlayer formation and study of wear mechanism in friction composites]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 55-63 (in Azerbaijani)

Friksion kompozitlərdə mikrotəbəqələşmənin SEM vasitəsilə tədqiqi və yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsi

F.F. Yusubov

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

Yazışma üçün:

Yusubov Fikrət / e-mail: fikratyusub@gmail.com

Xülasə

Məqalə ovuntu metallurgiya metodları ilə hazırlanmış friksion kompozisiya materiallarının yeyilmə səthlərinin araşdırılmasına həsr edilmişdir. Müxtəlif sürtünmə rejimlərində təmas səthlərində baş verən dəyişiklikləri və mikrotəbəqələşmənin xarakterini öyrənmək üçün enerji-dispers X-ray spektrometri (XRD) ilə təchiz olunmuş skanedici elektron mikroskopdan (SEM) istifadə edilmişdir. Əldə edilmiş nəticələr oksidləşmə yeyilməsinin təqribən bütün mərhələlər üçün xarakterik olduğunu göstərmüşdür. Həmçinin friksion mikrotəbəqələşmənin formallaşma ardıcılılığı müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: kompozitlər, sürtünmə, yeyilmə, deqradasiya, oksidləşmə, adgeziya, mikrotəbəqələşmə.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_55_63

УДК: 621.891: 622.67

Исследование формирования микрослоев с SEM и изучение механизмов износа во фрикционных композитах

Ф.Ф. Юсубов

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

Для переписки:

Юсубов Фикрет / e-mail: fikratyusub@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена исследованию поверхностей износа фрикционных композиционных материалов, полученных методом порошковой металлургии. Растворный электронный микроскоп (SEM), оборудованный энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (XRD), был использован для изучения изменений контактных поверхностей при различных режимах трения и природы микрослоя. Результаты показали, что окислительный износ характерен практически для всех этапов. Также была определена последовательность формирования фрикционных микрослоев.

Ключевые слова: композиты, трение, износ, деградация, окисление, адгезия, микрослои.

Giriş

Friksion temperatur sürtünmə əmsalına təsir göstərən əsas faktorlardan biridir [1]. Bərk cisimlər arasında sürtünmə zamanı materialların təmas səthləri arasında elastik və plastik deformasiyanın baş verməsi istiliyin yaranması ilə nəticələnir [2]. Yaranmış yüksək temperatur qradiyenti səthə perpendikulyar istiqamətdə paylanır. Yüksək temperaturlarda termiki deqradasiyanın baş verməsi tətbiq edilən qüvvəni azaldaraq sürtünmə əmsalını aşağı salır. Bunun əsas səbəbi sürtünmə zamanı yaranan enerjinin böyük bir hissəsinin istilik enerjisiniçəvrilməsiylə materialların təmas səthinin deformasiya və dağılımasına gətirib çıxarması ilə əlaqədardır [3]. Yüksək təzyiq və temperatur təmas səthlərinin morfologiyası və kimyəvi strukturuna təsir etməklə, sürtünmə prosesinin müxtəlif mərhələlərində yeni qatlar formalaşır və yenidən dağıla bilir [4]. Təbiidir ki, yeyilmə prosesi baş verən müddətdə səthlərin geometriyasının dəyişməsi sürtünmə fəaliyyətinə ciddi təsir göstərir. Nümunələrin səthində baş verən dəyişiklikləri müəyyənləşdirmək üçün sürtünmə səthləri SEM-lə tədqiq edilmiş, formalaşmış friksion qatların kimyəvi tərkibləri enerji dispers X-ray spektroskopiya - element tərkibi analizi (XRD) vasitəsilə araşdırılmışdır. Friksion qatların tədqiq edilməsi kompozisiya materiallarının friksion fəaliyyətini, yeyilmə mexanizmlərini qiymətləndirməyə kömək etmişdir. SEM təsvirlərinin alınması üçün $<9.0 \times 10^3$ Pa vakuum təzyiqindən istifadə edilmişdir. Araşdırma üçün barit 25%, fenolformaldehid 25%, vollastonit 5%, aluminium dioksid 7%, qurğunun 10%, qalay 10%, silisium dioksid 7%, mis-qrafit 8% və əlavə olaraq hərəsindən 1 kt.% olmaqla tunc qırıntıları, molibden disulfid, maqnezium oksid tərkibli və az miqdarda plastifikator (qliserin) qatılmış kompozitdən istifadə edilmişdir

İşin məqsədi

Sürtünmə prosesində friksion əyləc kündəsi materialların təmas səthlərində mikrotəbəqələşmənin formalasması, onların triboloji xassələrə təsirlərinin müəyyənləşdirilməsi və yeyilmə mexanizmlərinin öyrənilməsi.

Məsələnin qoyuluşu

Tədqiq olunan materialların səthlərində baş verən dəyişiklər müxtəlif sürtünmə rejimlərində aparılmış sınaqlara əsasən araşdırılmışdır. Sürtünmə sınaqları "barmaqcıq-disk" mexanizmi üzrə (vertikal sürtünmə maşını MMW-1) 2000 dövr/dəq sürətlə, 1000 N yük-lə 200, 1100 və 2500 san. müddətlərində aparılmış və alınmış nəticələr müqayisə edilmişdir. 1100 və 2500 san. müddətində aparılan sınaqlarda səth temperaturu müvafiq olaraq ~ 320 və $>360^\circ\text{C}$ təşkil etmişdir. 200 san. müddətində aparılmış sınaqlarda temperatur aşağı olduğundan səthlərdə istilik amili ilə bağlı nəzərə çarpacaq dəyişiklik baş verməmişdir. Seçilmiş sınaq müddətlərində təmas səthlərində baş verə biləcək dəyişikliklər mümkün deqradasiya, oksidləşmə və digər termiki proseslərə əsasən seçilmişdir.

Məsələnin həlli

MMW-1 qurğusunda seçilmiş sınaq müddətləri üçün aparılmış triboloji sınaqların nəticələri cədvəl 1-də verilmişdir.

Yeyilmə intensivliyinin hesablanmasında aşağıdakı düsturdan istifadə edilmişdir:

$$J = \frac{m_1 - m_2}{\tau}$$

Burada, m_1 və m_2 müvafiq olaraq yeyilmədən əvvəl və sonra olan kütlə (qramla), τ - eksperimentin müddəti (saatla), J - isə yeyilmə intensivliyidir (q/saat).

Cədvəl 1 – Müxtəlif vaxt rejimlərində aparılmış sürtünmə sınaqlarının nəticəsi

Table 1 – Results of friction tests performed at different time modes

Vaxt (san.)	Yeyilmə intensivliyi (q/saat)	Sürtünmə əmsalı (μ)	
		maks.	min.
200	0.002	0.34	0.26
1100	0.007	0.46	0.32
2500	0.010	0.29	0.25

Tribolji sınaqların nəticələri yeyilmə intensivliyinin 1100 san. müddətində sürtünmədə daha yüksək olduğunu göstərmişdir ki, bu da təqribən 350°C -dək baş verən deqradasiya və dekompozisiya ilə bağlıdır. Təbiidir ki, sür-

tünmə müddətinin çox olması yeyilmənin də çoxalması deməkdir. Sürtünmə əmsalının maksimum və minimum qiymətlərinin fərqli olması da, məhz deqradasiya və dekompozisiya mexanizmlərindən asılı olaraq sürtünmə səthlərinin dağılıma və formalaşmasıyla əlaqəlidir.

Apardığımız araşdırımlar mühit şəraitlərindən və materialın əyləmə fəaliyyətindən asılı olaraq 3 əsas xarakterik friksion qatın formalaşdığını göstərdi: ilkin mərhələdə formalaşan əlavə qat, deqradasiya nəticəsində yaranan qat və ya qaz qatı və oksidləşmə qatı (cədvəl 2).

Cədvəl 2 – Nümunələrdə aşkar edilmiş friksion qatların mümkün formalaşma mərhələləri
Table 2 – Stages of possible formation of friction layers found in the specimens

Mərhələlər ($^{\circ}\text{C}$)	İlkin qat	Deqradasiya qatı	Oksidləşmə qatı	Bərk sürtkü qatı	Abraziv qat	Qaz qatı
25-250	+		+	+	+	-
250-350	-	+	+	+	+	+
350-1000	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-

(+ iştirak edir, -iştirak etmir, +/- isə hər iki varinatın mümkünlüyünü bildirir)

Əlavə qat sürtünmənin ilkin mərhələsində mexaniki təsirlərdən formalaşır. Friksion temperaturun artması ilə oksidləşmə və digər qatlar formalaşmağa başlayır [5]. Müşahidə edilən əsas qatlardan əlavə ehtimal olunan digər qatlar da cədvəldə qeyd edilmişdir. Sürtünmə cütləri hava mühiti ilə daim təmasda olduğu üçün oksidləşmə prosesi sürtünmənin ilkin dövründən başlayır. Lakin kövrək olduqları üçün yüksək temperaturlarda bu qatın qalması ehtimalı aşağıdır və bu səbəbdən cədvəldə “+/-“ işarəsi ilə verilmişdir. Bərk sürtkü və abraziv komponentlərin yaratdığı qatlar da ilkin mərhələlərdən başlayır, lakin yüksək tem-

peraturlara davam gətirməsi ehtimal edilə bilər.

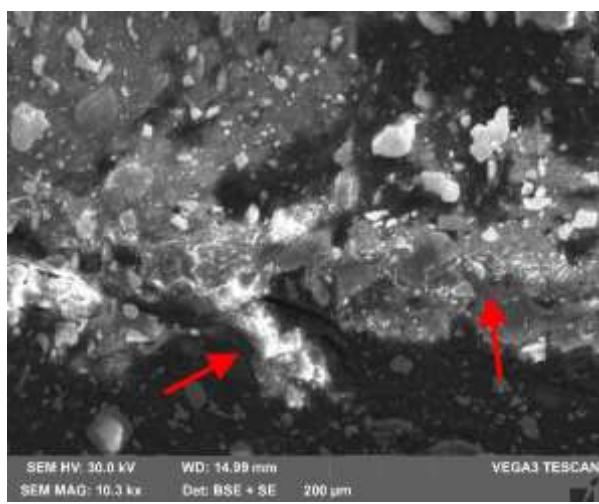
Ilkin qatlar. Məlumdur ki, təmas materiallarının səthlərində baş verən yeyilmə və müxtəlif fiziki-kimyəvi proseslərin xarakteri həmin materialların səth hamarlığı ilə əlaqəli olan bir prosesdir. Normal yük verildikcə nümunənin səthi diskin səthinə doğru sıxılır və hər iki səthdə olan nahamarlıqlar bir-birinə keçir [6]. Diskin bərkliyi kompozitin bərkliyindən çox yüksək olduğundan yüksək sürətlə fırlanma hərəkətində nümunənin yeyilməsi baş verir və nümunədən qopmuş hissəciklərin bir çoxu təmas səthində qalaraq yenidən fırlanma hərəkətinə qoşulur. Dövrlərin sayı artdıqca,

yeylimiş hissəciklər getdikcə deformasiyaya, əzilməyə və sıxılmaya məruz qalaraq yeni bir qat formalaşır.

Yeni sürtünmə və yeyilmə prosesinə ciddi təsir göstərir. Sürtünmə qüvvəsi yalnız həqiqi təmas sahələrinə təsir edir. Nümunələrin səthindəki həqiqi təmas sahələri ümumi sahə ilə müqayisədə çox aşağı olur və diskə təmas əsasən bu sahələrlə baş verir. Diskin fırlanması ilə deformasiya və yeyilmə nəticəsində həqiqi təmas səthlərinin dəyişikliyə uğraması titrəmələrə səbəb olur ki, bu da materialların sürtünmə fəaliyyətində öz əksini tapır. Təzyiq, temperatur, deformasiya və yeyilmənin dəyişməsi həqiqi təmas sahəsinin ölçüsünə təsir göstərir.

Şəkil 1-də kompozitin səth təsvirində həqiqi təmas sahələri qeyd edilmişdir.

Sürtünmənin başlanğıcında hələ kələ-kötür formada olan bu hissələrdə dövrlərin sayı artırıqca hamarlaşma başlayır və sürtünmə müəyyən qısa zaman kəsiyində stabil artımla davam edir. Lakin burada, abraziv hissəcik faktoru da müəyyən təsirlərə malikdir.



(Oxlardan həqiqi təmas sahələrini göstərir)

Şəkil 1 – Həqiqi təmas sahələrinin SEM görünüşü
Figure 1 – SEM view of real contact areas

Tərkibdə olan Al_2O_3 və SiO_2 kimi abraziv komponentlər sürüstmə yeyilməsinə qarşı müqavimət yaratmaqla yanaşı həqiqi təmas sahələrinin formalaşmasında mühüm rol oynadılar. Lakin abraziv hissəciklər sürtünmə xassəsini yaxşılaşdırılsalar da yeyilmənin artmasına xidmət edir. Metal qatı ilə disk arasında adgeziya qüvvəsi metal qatı ilə nümunə arasında olan qüvvədən üstün olduqda metal qatı adgeziv və abraziv yeyilmə ilə daşılaçqdır. Nümunənin sürtünmə səthi sahəsinin sərt dənəvərcikləri əyləc diskinin üst səthində çizilmələrə yol açır. Polad diskin sürtünmə səthinin sərt zirvələri də həmçinin əyləc kündəsinin ince səthində çiziqlər yaradır. Toqquşma həm də iki sərt birləşmə arasındakı sürtünmə prosesində də yaranır. Sərt dənəvərciklərlə əyləc kündəsinin arasındaki birləşmiş güc diskin sərt nöqtələrini qopardan gücdən zəif olduqda müxtəlif mexaniki təsirlər nəticəsində əlaqənin itirilməsindən növbəti hissə yaranır. Bu isə müvafiq olaraq sürtünmə cütünüň, xüsusilə də əyləc kündəsinin yeyilməsini çətinləşdirir. Bu mərhələdə, aşağı temperatur yarandığından, yeyilmə sahəsində üst səth qabığı olmur.

Lakin sürtünmə şərtlərində asılı olaraq abraziv yeyilmə mexanizmi fərqli xarakter də daşıya bilər. Belə ki, funksional doldurucu kimi tərkibə qatılmış vollastonit materialından ibarət hündür nahamar sahələr təmas zamanı diskin daha sərt nahamar hissələri ilə toqquşaraq yeyilir. Yeyilmiş hissəciklər müəyyən bir vaxt müddətində ya diskin səthinə yapışaraq qalırlar, yaxud da diskə kündə arasında qalaqlaşaraq sürtünmə prosesində iştirak edirlər. Lakin friksion istilik təsirlərindən əlaqələndirici (fenzolformaldehid) öz funksiyasını itirdikcə, səthdə qalan komponentlər də yumşalaraq hissəciklərə yarılaraq abraziv yeyilmədə iştirak edirlər [7].

Bərk sürtkü materiallarının yaratdığı qat. Friksion qatın formallaşması səthlərin termiki fəaliyyəti ilə yanaşı tərkib elementlərindən də asılıdır. Yüksək təzyiq və temperatur təsirləri altında friksion qatın formallaşmasında üzvi elementlər, liflər və xüsusiilə də bərk sürtkü materialları böyük rola malikdir [8]. Bərk sürtkü materialları həm kompozit, həm də diskin təmas səthinin həddən artıq yeyilməsinin qarşını ala bilir. Həmçinin bərk sürtkü materialları əyləmə prosesində yaranan səs-küyün və vibrasiyanın aradan qaldırılmasında əsas vasitələrdən biri hesab olunur. Təklif olunan kompozisiya materiallarında friksion qatın formallaşmasında molibden disulfid, qrafit kimi bərk sürtkü materiallarının da iştirakı ilə yanaşı misin də bərk sürtkü rolunu oynadığı məlumdur. Friksion istilik nəticəsində mis səthdə bərk sürtkü materialı rolunu oynayaraq mis qatı yaradır [9].

Şəkil 2-də 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunənin SEM vasitəsilə çəkilmiş səth təsvirləri verilmişdir. Təsvirlərdən göründüyü kimi sürtünmə səthinin struktur forması ilkin səthdən fərqli olaraq çoxsaylı kiçik sahələrə dolmuşdur. Bu fenolformaldehidin deqradasiyası nəticəsində sərbəst fenolun ayrılması ilə əlaqəlidir. Səthdə olan hissələrdən əlavə, daxili zonalardan çıxan formaldehid səthlə yeni sahələr yaratmışdır ki, bu da sürtünmənin kəskin aşağı düşməsinə səbəb olan xassəni formalasdırır. 1100 san. müddətində aparılmış sınaqlarda sürtünmə əmsalının maksimum və minimum qiymətləri arasındakı kəskin fərq bu səbəbdən olmuşdur (cədvəl 1).

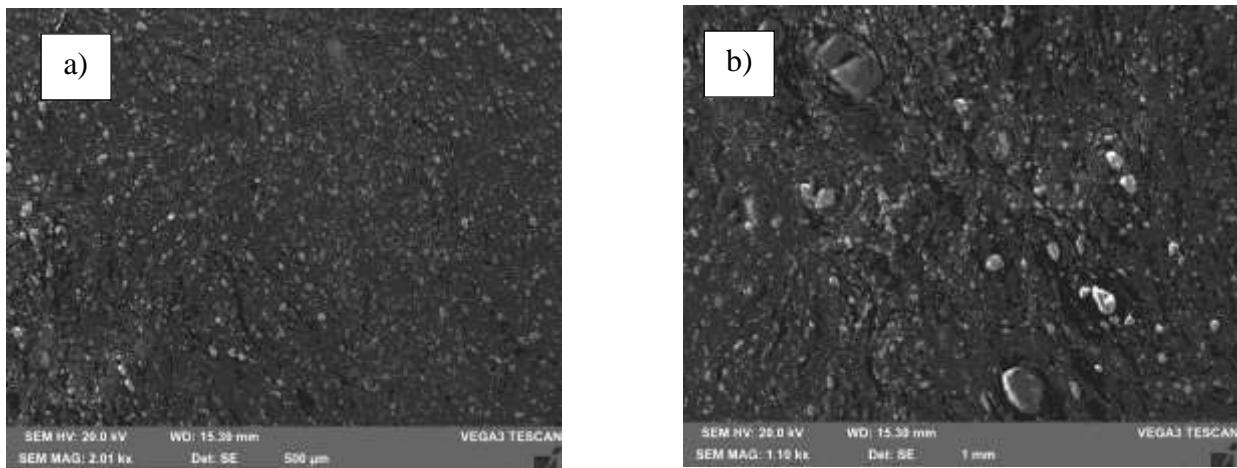
Bütün bunlarla yanaşı sürtünmənin ilkin fazasında, friksion materialların tərkibindəki üzvi komponentlərin termiki deqredasiyası nəticəsində özlərindən qazlar (CO , CO_2 , CH_4 və H_2) buraxırlar. Bu qazlar sürtünmə səthləri tərəfindən adsorbsiya edilə bilmədikləri üçün

qaz qatı əmələ gətirirlər. Bu qaz qatı xarici sürtünmə səthində sürtkü rolunu oynayaraq sürtünməni azaldır [10].

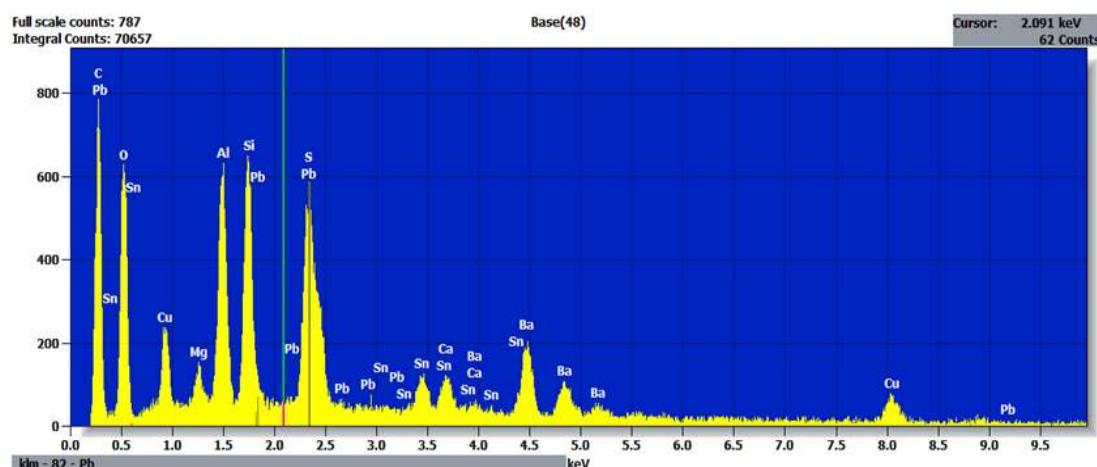
Deqradasiya nəticəsində yaranan qat

Şəkil 3-də müxtəlif rejimlər tədqiq edilmiş nümunələrin səthlərinin kimyəvi quruluşu haqqında məlumatlar verilmişdir. Təmas səthində əmələ gələn istilik təsirindən sürtünmə prosesində friksion qat formalasdır. Buna görə də sürtünmə cütlərinin ilkin səthinin kimyəvi xüsusiyyətləri sürtünmədən sonrakı səthdən fərqli olmuşdur. Şəkildə əsas nəzərə çarpan məqamlardan biri C və O_2 elementlərinin 1100 və 2500 san. sınaq müddətlərində fərqli olmasınadır. Bu sürtünmə səthlərdə termiki təsirlərdən baş verən dəyişiklikləri izah etməyə kömək edir. Şəkil 4-də XRD qrafikində şəkil 3-də verilmiş qrafikdən fərqli olaraq karbon fazaların çoxluq təşkil etməsinin əsas səbəbi 400°C -dən sonra formaldehidin karbonlaşması ilə bağlıdır. Sürtünmə əmsalının kəskin enməsi və yenidən yüksəlməyə başlaması, yeyilmə kimi göstəricilər hamısı friksion qatın xarakterindən çox asılıdır.

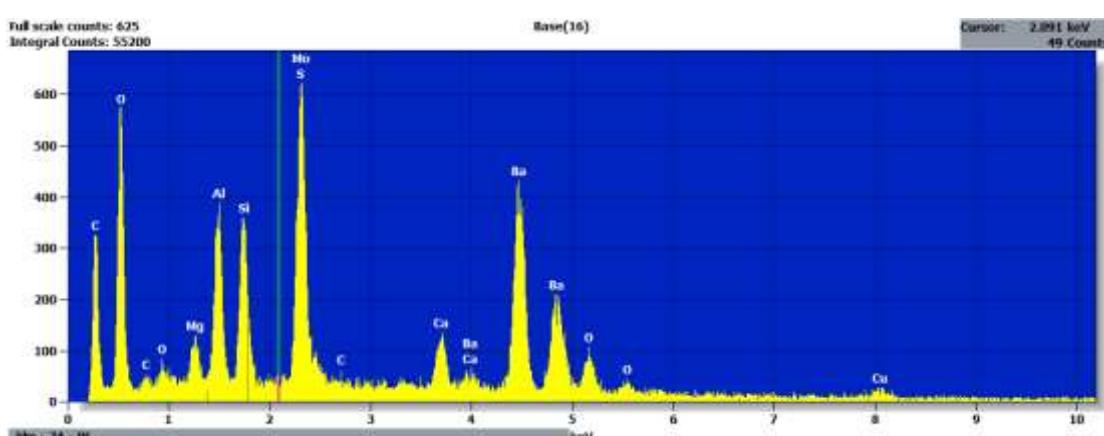
Friksion qatın formallaşmasının ən mühüm xüsusiyyəti isə sürtünmə əmsalının stabililiyini artırmasıdır. Belə ki, yeni qatın formallaşması yeni təmas səthlərini formalasdıraraq sürtünmə xarakteristikasını stabillaşdırmaqla yanaşı, həm yeyilmənin qarşısını alır, həm də səs-küyün aradan qalxmasında da yardımçı olur. Friksion qatın formallaşma prosesi çox mürəkkəb prosesdir və sürtünmə səthlərinin termiki parametrlərində asılı olaraq müxtəlif xarakterə malik ola bilər. Sürüşmə sürəti, təmas təzyiqi və temperatur amilindən asılı olaraq friksion qatın mikrostrukturu fərqli ola bilir. 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunənin səthinin element tərkibi sürtünmədən əvvəlki element tərkibindən fərqli çıxmışdır.



Şəkil 2 – Nümunənin sürtünmə sıqalqlarından a) əvvəl və b) sürtünmənin ilkin mərhələsində səth təsvirləri.
Figure 2 – Surface images of the sample a) before friction tests and b) at the initial stage of friction.



Şəkil 3 – 1100 san. müddətində aparılmış sürtünmə səthinin XRD analizi
Figure 3 – XRD analysis of the friction surface performed in 1100 sec.



Şəkil 4 – 2500 san. müddətində aparılmış sürtünmə səthinin XRD analizi
Figure 4 – XRD analysis of the friction surface performed in 2500 sec.

Bu dəyişikliyin səbəbini fenolformalda-hedin 200-320°C temperaturda deqradasiyaya uğramasıyla izah etmək olar.

Şəkil 5-də verilmiş təsvirdə ayrıca mis qatlarına rast gəlinməsə də, oksigenlə zəngin sahələrdə mis elementinə rast gəlinmişdir. Yüksək temperaturlarda səthdəki nanokristalların yenidən kristallaşması nəticəsində kövrək friksion qat formalaşır ki, bu da bir növ qrafit-də olduğu kimi yeni qat formalaşdıraraq bərk sürkü rolunu oynayır. Friksion qat sürtünmə əmsalını azaltsa da, nəticə etibarilə disk və kündənin təmas sahəsindən ayrılan digər material hissəciklər ilə qarışaraq, triboloji xassələrin stabillaşməsinə səbəb olur. Bu qatin formalashması adgeziya yeyilməsini aşağı salır və sürtünmə əmsalını stabillaşdırır.

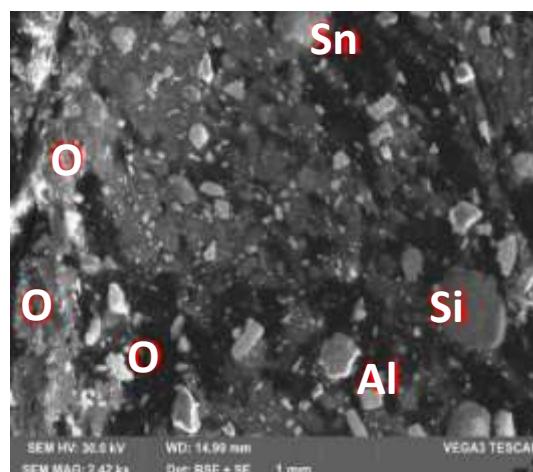
Oksidləşmə qatı

Şəkil-5-də 2500 san. müddətində SEM-lə çəkilmiş təsviri verilmişdir. Sürtünmə səthlərinin XRD analizi oksigenlə zəngin sahələrin çoxluğunu göstərmüşdür. Həmçinin səthdə C, O₂, Si və Al kimi elementlərə də rast gəlinmişdir. Bu bütün nümunələrdə oksidləşmə yeyilməsinin çoxluq təşkil etdiyini göstərmüşdür (şəkil 4).

Yüksək temperatur və sürət rejimində materialların səthi dərhal havadakı oksigenlə reaksiyaya girərək oksidləşmə qatı əmələ gətirir. Sürtünmə sınaqları zamanı nümunələr açıq hava ilə təmasda olduğundan artıq ilkin mərhələlərdən başlayaraq metal komponentlərinin oksidləşməsi baş verir. Sürtünmə cütlərinin sürtünmə və yeyilmə xarakteristikası, təmas sahələrinin formalashması, dağılıması və inkşafı, forma adaptasiyası, termiki deformasiya kimi proseslərdən çox asılıdır. Friksion istilik materialın oksidləşməsinə, termiki möhkəmliyinə və plastikliyinə təsir göstərir. Bu isə səth strukturunun dəyişməsinə (sürtünmə səthində

atom və ya molekulların diffuziya və adsorbsiyası) və faza çevrilmələrinə səbəb olur.

Dəyişmələr nəticəsində səthlər arasında qarşılıqlı təsirin dəyişməsi quru sürtünmə fəaliyyətinə də öz təsirini göstərir. Oksidləşmə qatı çox kövrək olur və sürtünmə qüvvəsinin təsirilə çox keçmədən dağılma və yeyilməyə məruz qalır. Oksidləşmə qatının yeyilməsi qatın bərkliyi ilə kompozitin bərkliyi arasındaki asılılıqdan asılıdır.



Şəkil 5 – Yeyilmə səthinin SEM təsviri və çoxluq təşkil edən elementlərin paylanması sahəsi

Figure 5 – SEM images of the worn surface and the area of distribution of the dominant elements

Friksion qatın bərkliyi kompozitin bərkliyindən nə qədər az olarsa, yeyilmə də bir o qədər çox olacaqdır. Oksidləşmə qatı friksion materialın səthini əkscisim materialının təmasından qorumaqla yeyilmənin müqavimətini artırmasından əlavə sürtünmənin də azalmasına səbəb olur. Oksidləşmə qatı həm də friksion materialın səthini əkscisim materialının təmasından qorumaqla, sürtünmə əmsalını azaldır və yeyilmənin müqavimətini isə artırır. XRD analizin nəticələrinə əsasən müxtəlif vaxt müddətlərində aparılmış sınaqlara müvafiq olaraq temperatur dəyişməsinə görə yeyil-

mə səthlərinin element tərkibi şəkil 3-də verilmişdir.

Nəticə

Təcrübələr verilmiş tərkib üçün sınaq rejimlərindən asılı olaraq əsasən üç potensial friksion qatın formalasdığını göstərdi: ilkin mərhələdə formalasan əlavə qat, deqradasiya nəticəsində yaranan qat və ya qaz qatı, oksidləşmə qatı. Yeyilmə intensivliyi 1100 san.

müddətinədək daha yüksək olmuş və oksidləşmə yeyilməsi təqribən bütün mərhələlər üçün xarakterik olmuşdur. Eyni zamanda, 1100 san. müddətində sınaq edilmiş nümunələrdə friksion istiliyiin 320-340°C çatmaqla üzvi komponentlərin deqradasiyaya uğradığını və 2500 san.-dən sonra 340-400°C həddinə çatmaqla fenolformaldehidin karbonlaşması təsdiq edilmişdir.

REFERENCES

1. **Janahmadov A.Kh. Pirverdiev, E.S. Volchenko A.I.** [i dr.]. Uzly treniya v mashinostroenii. Baku: Elm, 2018. - 440 s. (*in Russian*).
2. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Javadov M.Yu.** [i dr.]. Vliyanie vlazhnosti na ekspluatacionnye parametry triboscepleniya tormoznyh mekhanizmov i ih udalenie s poverhnostej // Vestnik Azerbajdzhanskoy inzhenernoj akademii, 2019. T. 11, №2, s.15-22 (*in Russian*)
3. **Sugozu K.B.** Friction and wear properties of friction materials containing nano/micro-sized SiO₂ particles // Industrial Lubrication and Tribology, 2016. Vol. 68 (2), pp.259–266 (*in English*)
4. **Piyush C.V., Rodica C., Andrea B.** [et al.]. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material // Wear, № 346-347, pp. 56-65 (*in English*)
5. **Xiao X., Yin Y., Bao J.** [et al.]. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 8(5), 2016. Pp.1-10 (*in English*)
6. **Guanchen L., Xiaoliang S., Yuchun H.** [et al.]. Effects of friction layer characteristics on the tribological properties of Ni3Al solid-lubricating composites at different load conditions // Materials Research Express, 2018. Vol. 5 (5), pp.1-10 (*in English*)
7. **Jiusheng B., Yan Y., Zhencai Z.**, [et al.]. (2012). Wear Modalities and Mechanisms of the Mining Non-asbestos Composite Brake Material. *Applied Composite Materials*. Vol.20 (4), pp.331-339 (*in English*)
8. **Filip P., Weiss Z., Rafaja D.** On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications // Wear. 2002. Vol. 252 (3–4), P.189-198 (*in English*)
9. **Sanjeev S., Jayashree B., Mukesh K.** Comparison between nano-and micro-sized copper particles as fillers in nao friction materials // Nanomaterials and Nanotechnology, 2013. Vol. 3(1). Pp.1-9 (*in English*)
10. **Zhu Z., Bao J., Yin Y., Chen, G.** Frictional catastrophe behaviors and mechanisms of brake shoe for mine hoisters during repetitious emergency brakings, Industrial Lubrication and Tribology, 2013. Vol. 65 (4), pp. 245-250 (*in English*)

The Role of Contact Spots of Friction Pairs of Microprotrusions in The Energy Loading of Braking Devices

D.A. Volchenko¹, H.F. Miralamov², V.S. Skrypnyk¹,
N.A. Volchenko³, D.Y. Juravlev¹

¹ Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

² Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

³ Kuban State Technological University (Moskovskaya st. 2, bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)

For correspondence:

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

Abstract

The article demonstrates that the presence of temperatures (flash, surface and volume) requires clarification that there is still a steady temperature and a thermal stabilization state of a metal friction element, when the temperature gradient over its thickness remains constant and minimal for some time. Relationships between one and two materials of metal friction linings with impulsive normal forces and current surface-volume temperatures of friction pairs and the allowable temperature of the FK-24A material are established. The introduction of the obtained data on the energy levels of the contact patches of microprotrusions of friction pairs of brakes will significantly improve their quality and significantly reduce the volume of tribological studies.

Keywords: braking devices, friction pairs, microprotrusion contact spots, dynamic and thermal load.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_64_73

Received 07.04.2021
Revised 17.06.2022
Accepted 20.06.2022

For citation:

Volchenko D.A., Miralamov H.F., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Juravlev D.Y.
[The role of spots of contacts of friction pairs microproperties in the energy loading of braking devices]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 64-73 (in English)

Əyləc qurğularının enerji yüklənməsində sürtünmə cütü mikroçixıntılarının kontakt ləkələrinin rolü

D.A. Volçenko¹, H.F. Mirələmov², V.S. Skripnik¹,
N.A. Volçenko³, D.Y. Juravlev¹

¹İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç. 15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

²Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

³Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

Yazışma üçün:

Skripnik Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Xülasə

Məqalədə göstərilir ki, səth və həcmi temperaturlarının işıltısının mövcudluğu, onun qalılığı üzərindəki temperatur qradiyenti bir müddət sabit və minimal qaldıqda belə, qərarlaşmış temperatur və metal sürtünmə elementinin termostabilizasiya vəziyyətinin də mövcud olmasının dəqiqləşdirilməsini tələb edir. Metal friksion kündələrin bir və iki materialları ilə impuls normal qüvvə, sürtünmə cütünün cari səth-həcmi temperaturu və FK-24A materialının buraxıla bilən temperaturu arasında nisbətlər müəyyən edilmişdir. Əyləclərin sürtünmə cütlərinin mikroçixıntılarının kontakt ləkələrinin enerji səviyyələri haqqında məlumatlar əldə edilmişdir.

Açar sözlər: əyləc qurğusu, sürtünmə cütü, mikroçixıntılarının kontakt ləkəsi, dinamik və istilik yüklənmə.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_64_73

УДК: 621.01

Роль пятен контактов микровыступов пар трения в энергонагруженности тормозных устройств

Д.А. Вольченко¹, Г.Ф. Мираламов², В.С. Скрыпнык¹,
Н.А. Вольченко³, Д. Ю. Журавлев¹

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

²Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

³Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

Для переписки:

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

Аннотация

В статье показано, что наличие вспышки, поверхностной и объемной температур требует уточнения, так как есть еще установившаяся температура и термостабилизационное состояние металлического фрикционного элемента, когда градиент температуры по ее толщине на некоторое время остается постоянным и минимальным. Установлены соотношения между одним и двумя материалами металлических фрикционных накладок с импульсными нормальными силами и текущими поверхностно-объемными температурами пар трения и допустимой температурой материала ФК-24А. Получены данные об энергетических уровнях пятен контактов микровыступов пар трения тормозов.

Ключевые слова: тормозные устройства, пары трения, пятна контактов микровыступов, динамическая и тепловая нагрузка.

Introduction

Both the rheological characteristics that determine the contact interactions of the spots of microprotrusions of the friction surfaces of the brakes and the frictional characteristics of friction depend on the energy load of the friction unit. In the process of sliding friction surfaces, heat is generated and its surface-volume temperature rises. With the relative rest of the friction surfaces due to the removal of heat, the surface-volume temperature decreases.

Heat removal from matte and polished surfaces of metal friction elements also takes place with relative sliding of friction surfaces. The wear resistance of friction surfaces depends on the rheological and frictional characteristics of the friction pairs and, therefore, on the surface-volume temperatures of heating of the friction pairs.

Analysis of literature data and statement of the problem

The paper [1] presents the results of a study of the friction force up to the slip threshold. With the help of a second-order differential equation relating stresses and deformations of bodies under the action of forces, the laws of change in the friction force, as well as the criterion for choosing materials for friction pairs, are established. Only the mechanical component of the friction power was taken into account.

The work [2] is devoted to the study of impulse specific loads in friction pairs of a drawworks band-shoe brake. In the latter, no attention was paid to the displacement of the contact of microprotrusions of friction pairs up to the slip threshold. This parameter significantly affects the static coefficient of mutual overlap of brake friction pairs.

The work [3] is devoted to deformations

of contact patches of microprotrusions of friction pairs of a band-shoe brake. However, it did not consider the displacement of contacts of microprotrusions and their influence on the increase in the area of frictional interaction. The change in the free energy of the near-surface layers of metal friction elements is given in [4]. However, this did not take into account the type of contact for the displacement of the contacts of microprotrusions of friction pairs under the action of an external energy impact. The work [5] considers neutral, blocking and ohmic contacts of microprotrusions of brake friction pairs. At the same time, the influence of the energy levels of various types of contacts on their displacement was not established. A significant part of the stresses arising in the process of electro-thermomechanical braking is concentrated in the surface layers of metal friction elements. In microzones of actual touch spots, as shown in [6, 7]. These stresses become proportional to the flash points and cause strong heating in thin layers of the friction surface, leading to the formation of burns, thermal spots and microcracks. During cooling after braking of the friction element, a temperature gradient occurs, causing large thermal stresses. Surface temperature gradients determine the non-uniformity of the thermal field [8], and temperature gradients across the thickness of the metal friction element determine the thermo-stable state [9].

The constant value of the surface temperature gradient is characteristic of the steady temperature, when the amount of heat generated on the friction surface for some time is equal to the amount of heat removed to the environment. With a thermally stable state of a metal element, the temperature gradient over its thickness becomes minimal in magnitude.

The following questions were included in the materials of the article: levels of energy loading of friction pairs of brakes; energy levels of contact patches of microprotrusions of friction pairs under their dynamic loading; the discussion of the results.

The aim of the work is to establish the role of contact spots of microprotrusions in the formation of thermal fields in friction pairs of braking devices.

Levels of energy loading of friction pairs of brakes

The levels of energy loading of friction pairs of brakes are determined by the flash temperatures, surface and volume, which are characteristic of a thermal field. We believe that it is in the surface layer that, under the action of the flash temperature ϑ_{fl} , thermal fatigue cracks are initiated. These cracks develop further between braking cycles as a result of cooling of the surface layer and the formation of a temperature gradient from ϑ^* , when the thermal stresses under the surface layer reach the highest values. With an increase in the surface-volume temperature, the nature of the transformation of structural components in the material changes, the strength of the grain boundaries decreases, and the oxidation rate increases. All these processes affect the crack initiation mechanism.

Considering that the temperature flash can quickly reach several hundred degrees, these instantaneous temperature rises can bring the material into a state of plasticity, when the frictional resistance drops. Also, since the temperatures at the actual contact spots of microprotrusions do not exist for long (10^{-3} - 10^{-6}) s, it is not the properties of the stat-

ic strength of the surface layer of the materials of the friction pair that are important, but the properties of fatigue strength, given that the crystal lattice of a solid body reacts on impacts through 10^{-5} - 10^{-8} s [8]. Therefore, the restructuring of the surface layer under the action of external thermal loads occurs precisely in the process of the formation of the temperature field, and by the time the thermal stabilization state is reached, the surface layer is already under the action of certain residual stresses. The formula proposed in [8] was used to calculate the flash temperature ϑ_{fl} on a single microprotrusion contact spot:

$$\vartheta_{fl} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{\alpha_2 \sqrt{a_2} N_{fr}}{A_r [4\lambda_1 \sqrt{a_2} + \alpha_2 \sqrt{\sin d_r / S_k - S_{k+1}}]}, \quad (1)$$

where d_r – average diameter of microprotrusion touch spots; A_r – area of the actual touch spot; λ_1, λ_2 – coefficient of thermal conductivity of materials of micro protrusions of friction pairs; a_2 – coefficient of thermal diffusivity of the friction lining material; $S_k - S_{k+1}$ - sliding speeds of conjugate friction pairs.

Dependence (1) is valid for Peclet numbers $Pe = Vd_2 / a_2 \geq 20$. Typically, friction units operate at high initial relative speeds, usually at $Pe \geq 20$. At the end of the sliding stage of the friction surfaces, when the speeds $V = S_k - S_{k+1}$ become small $Pe \leq 20$, flash point ϑ_{fl} is small and is less than 5% of the surface-volume temperature ϑ . Based on this, the formula for determining ϑ_{fl} at $Pe \leq 20$ unsuitable. Taking into account that plastic deformations of microprotrusions take place during heating, the area of the actual spot of their contact is determined by the following approximate dependence

$$A_r = N / HB_2, \quad (2)$$

where N – impulsive normal load on friction

surfaces; HB_2 - Brinell hardness of the friction lining material.

The average diameter of a microprotrusion spot for a plastic microcontact is determined by the formula

$$d_r = \sqrt{\frac{8r_1 h_{Im}}{\nu} \left[\frac{N}{A_{cl} b_{01} HB_2} \right]^{0.5\nu_1}}, \quad (3)$$

where r_1, h_{Im} - radius of curvature and maximum height of microprotrusions; b_{01}, ν_1 - parameters of the reference curve of micro-roughnesses; A_{cl} - contour contact area.

So, to calculate the average temperature on the i -th friction contact patch, the dependence has the form

$$\vartheta_{ji} = \frac{\alpha_{hfdi} \psi_i b_i}{k_{cca} A_{ai} \lambda_i} \left\{ \left[\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \exp \left[-\alpha_i \left(\frac{\pi n}{b_i} \right)^2 t \right] \right] N_{fr} + \frac{a_i}{b_i} W_{fr} \right\}, \quad (4)$$

where α_{hfdi} - heat flow distribution coefficient, determining the share of the heat flux passing through the i -th surface of the contact spots of microprotrusions during friction ψ_i - coefficient taking into account the effective heat absorption of the volume of microprotrusions; b_i - average effective thickness of the i -th microprotrusions of friction pairs; k_{cca} - coefficient characterizing the formation of the constructive contour area of the microprotrusion contact patch; A_{ai} - nominal area of contact of surfaces of spots of microprotrusions; $a_i = \lambda_i / (c_i \rho_i)$ - thermal diffusivity (here λ_i - coefficient of thermal conductivity, c_i - specific mass heat capacity, ρ_i - material density of the i -th part constituting the friction pair); N_{fr} и W_{fr} - power and work of friction.

Friction pairs, consisting of metallic and non-metallic friction elements, washed by air flows in braking devices, are multilayer objects. The latter includes the working layer of the friction pair [8].

The process of formation of the working layer depends on the thermal mode of operation of the rubbing pair. There may be cases when the metal working layer does not have time to form, and then a very intensive spreading of the metal of the metal element of the pair (steel or cast iron) on the surface of the friction lining can occur.

The heat transfer coefficient in the heat exchange process through such a multilayer object as "the environment of the intercontact zone - a metal friction element - washing air" is determined by the dependence of the form:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}}, \quad (5)$$

where α_1, α_2 - heat transfer coefficients from: intercontact medium to the working (polished) surface of the metal friction element; its outer (matt) surface to the washing air; δ_1, λ_1 - the thickness of the rim and the coefficient of thermal conductivity of the metallic friction element.

The heat transfer coefficient in the heat exchange process through the "medium of the intercontact zone - the near-surface layer of the friction lining - the body of the friction lining - the base of the brake shoe - the air washing it" is determined by the dependence of the form:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \left(\frac{\delta_{sl}}{\lambda_{sl}} + \frac{\delta_l}{\lambda_l} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} \right) + \frac{1}{\alpha_3}}, \quad (6)$$

where α_3 - heat transfer coefficient from the matte surface of the base of the brake pad to the washing air; $\delta_{sl}, \delta_l, \delta_b$ - thickness: the surface layer of the friction lining, the lining itself and the base of the brake shoe; $\lambda_{sl}, \lambda_l, \lambda_b$ - thermal conductivity coefficients: the surface layer of the lining, the lining itself and the base of the brake shoe.

If the stabilization thermal state is

reached by the metal friction element of the brake device, the dependence for determining the heat transfer coefficient through the "washing air - the metal friction element, the medium of the intercontact zone - the surface layer of the friction lining" is determined by the dependence:

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{sl}}{\lambda_{sl}}}. \quad (7)$$

Dependencies (6) and (7) take into account the thermal resistance of the near-surface layer $\left(\frac{\delta_{sl}}{\lambda_{sl}}\right)$ of the friction lining, the value of which determines the direction of the heat flow.

Based on the values of heat transfer coefficients in friction pairs, we determine the coefficients of heat distribution between their elements during braking:

$$K = \frac{K'_{av}}{\sum K'_{av} + \sum K''_{av}}, \quad (8)$$

where $\sum K'_{av}$ - average value of heat transfer coefficients in the heat-exchange process "medium of the intercontact zone - metal friction element - air washing it" for the period of time from the beginning to the end of braking; $\sum K''_{av}$ - the average value of the heat transfer coefficients in the heat exchange process of the multilayer object "medium of the intercontact zone - near-surface layer of the friction lining - the body of the friction lining - the base of the brake shoe - the air washing it" for a period of time from the beginning to the end of braking.

It has been established that the increase in bulk temperature under conditions of heat transfer to the environment is quasi-proportional to the increase in the work of friction, and at the same time, the increase in

volume temperature is always less than the increase in the increase in surface temperature over the same time, and the decrease in volume temperature as a result of heat transfer to the environment occurs according to Newton's exponential law [8].

As a result, the following dependence was obtained for estimating the average bulk temperature at the stage of sliding friction surfaces

$$\vartheta_V(t) = \vartheta_{VO} + [\vartheta_V(t_{BS}) - \vartheta_{VO}] e^{-K_2(t-t_{BS})} + \\ + K_1 \int_{t_{HC}}^t N_T(\tau) e^{-K_2(t-\tau)} d\tau. \quad (9)$$

where ϑ_{VO} - ambient temperature; K_1' and K_2' - constant coefficients depending on the thermophysical properties of materials and the design of the friction unit; $N_{fr}(t)$ - friction power; $\vartheta_V(t_{BS})$ - average bulk temperature of a node at a moment of time t_{BS} , corresponding to the beginning of the slide.

The average bulk temperature at the stage of relative rest will be determined by the dependence

$$\vartheta_V(t) = \vartheta_{VO} + [\vartheta_V(t_{BR}) - \vartheta_{VO}] e^{-K_2(t-t_{BR})}, \quad (10)$$

where t_{BR} - the time of the beginning of the relative rest stage.

In the process of heating the friction units, the hardness of the materials of the friction elements decreases. In [9], the dependence of the hardness of the surface-bulk temperature was obtained as a result of processing experimental data

$$HB_2 = HB_{20} \left\{ m_1 + \frac{m_2}{[m_3 (\vartheta^* + \vartheta''_{mI} - \vartheta'_m)]^2 + 1} \right\}, \quad (11)$$

where HB_{20} - material hardness at normal temperature; m_1 , m_2 , m_3 - constant coefficients; ϑ'_m - the value of the surface-volume temperature at which HB (ϑ) maximum.

Energy levels of contact spots of microprotrusions of friction pairs under loading

The friction and wear characteristics of the friction pairs of the friction units of the brake change significantly depending on how the braking energy is absorbed. The latter largely depends on the method of its supply (impulse or continuous) in the process of braking. With the first method, a significant part of the friction work is realized at the initial stage of braking, and with the second method, the friction work is distributed over time more evenly. This determines the nature of the temperature fields, the values of surface and bulk temperatures, and their temperature gradients.

According to the molecular-mechanical theory of friction, implemented through electrothermomechanical frictional interaction, the dynamic coefficient of friction depends on the mechanical properties of the materials of the pair, the microgeometry of the contact spots of the protrusions of the elements of the friction pairs, which regulate the energy levels of the conduction contacts (ohmic, blocking and neutral) and adhesive properties [5, 8, 14].

All electrothermomechanical processes on the microcontact that affect the characteristics listed above also affect friction. During braking, the generated electric currents and the accumulated thermal currents at the friction contact change, occur at the friction contact, structural transformations occur, physicochemical reactions occur, and the properties of the surface layers of the materials of the friction pair change. The intensity of these processes is influenced by the load (impulse or continuous), sliding speed, temperatures (flash, surface and volume) and washing currents of the environment. Under the conditions of an unsteady friction process, these factors change continuously.

The processes of electrothermomechanical friction are carried out on the actual contact area, consisting of many discrete contacts with different electrothermal resistance, and, as a result, with different energy activity, accompanied by microcapacitors and microthermobatteries with their instantaneous switching when the areas of contact spots of microprotrusions change, subject to the conditions at the first stage of frictional interaction ($A_f < A_n$), based on the fact that the actual contact area (A_f) small compared to nominal (A_n) and at the same time, the components of the generated electric currents are summed, and under the condition $A_n = A_f$ the triboEMF is fixed in conjunction with the variable gradients of the mechanical properties of its materials. The rate of penetration of interacting pulses of electric and thermal currents affects the intensity of wear of microprotrusions during repolarization, and the magnitudes of thermal currents on the surfaces of the contact spots of microprotrusions are determined using the hypothesis of summation of temperatures on the surface, taking into account the generated electric currents

$$t_{GEN} = t_S + \Delta t_{S1}, \quad (12)$$

where t_S – surface temperature; Δt_{S1} – surface temperature that develops from the action of generated electric currents.

When analyzing the actual and contour contact area, it was found that they are continuously changing, since the mechanical properties of the materials of their surface and near-surface layers change under the influence of temperature deformations and stresses and are subject to wear. The contour contact areas are unevenly distributed over the surface, their distribution and migration also depend on the load and wear.

It is known that the surface temperature

of friction pairs is an integral factor reflecting the effect of the heat flux intensity on the friction contact q (specific friction power N_T), those joint effect of specific load (p), sliding speed (V) & dynamic coefficient of friction (f):

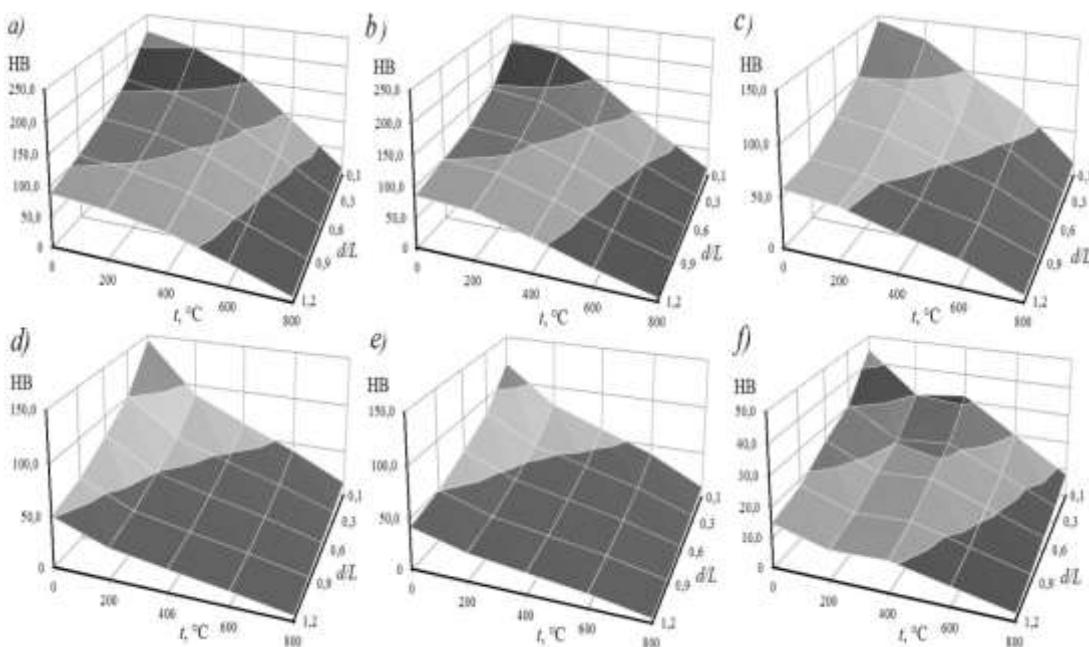


Figure 1 a, b, c, d, e, f. – Patterns of changes in the hardness of HB of various materials used in friction units, on temperature t and the relative value d/L (d , L are the diameter and friction path of the contact patch): a - steel 30KhGSA; b - cast iron ChNMKh; c – FPM brand FMK-845; d – FMK-11; e - FPM brand MVK-50A; f - retinax FK-16L

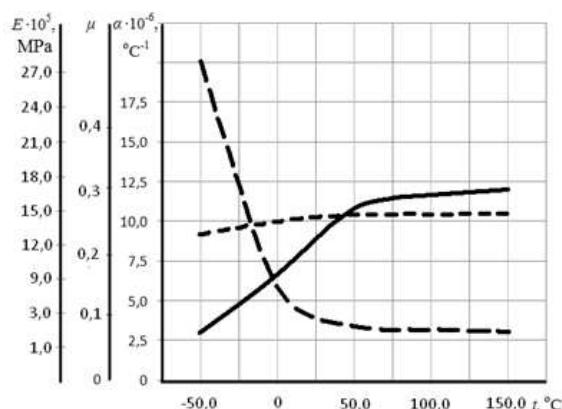
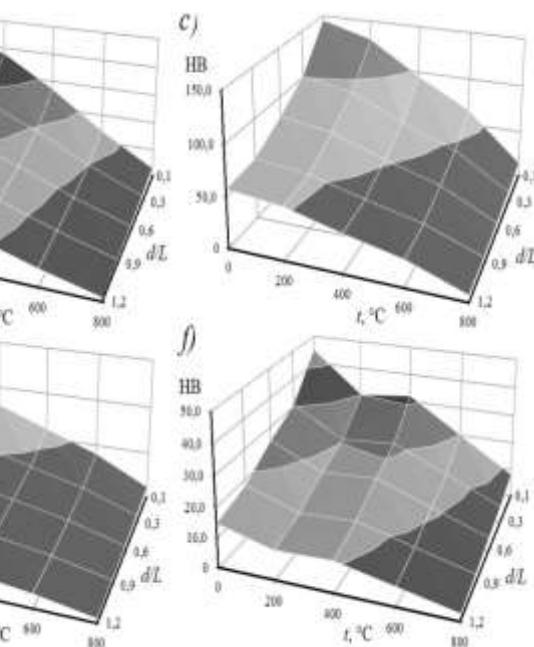


Figure 2 – Experimental dependences of the modulus of elasticity E (—), Poisson's ratio μ (—) and linear expansion coefficient α (—) steel 30HGSA on temperature t .

$$N = q_t = fpV. \quad (13)$$

Based on the foregoing, let's move on to the analysis of experimental data obtained in the laboratory.



The discussion of the results

On fig. 2 shows the experimental graphical dependences of the modulus of elasticity (E), Poisson's ratio (μ) and linear expansion coefficient (α) steel 30HGSA from temperature (t) from which it follows that the specified parameters in the temperature range (50.0-10.0) $^{\circ}\text{C}$ are constant. This is due to the fact that in the noted range of surface temperatures, a steady thermal state of friction pairs usually sets in.

As experimental studies and theoretical analysis show, the greatest influence on the change in the friction properties of materials

during braking is exerted by the surface temperature at the friction contact. Indeed, temperature significantly affects the mechanical properties of friction pair materials (Fig. 1 *a, b, c, d, e, f*). Especially, the change in the hardness of HB metal friction elements is not noticeable (рис.1 *a, b*) from temperature (in the interval from 300 to 500 °C) and relative to the value d/L (d , L – diameter and friction path of the contact patch). As for friction lining materials (рис.1 *c, d, e, f*), then in their surface layers in the above temperature range, the phenomenon of tribocracking took place, significantly reducing the hardness of the surface layers of the overlays.

It has been established that the ratio of the hardness of steel according to Brinell to the same parameter for cast iron (Fig. 2) is inversely proportional to the ratio of the acting impulse normal forces on cast iron and steel and is expressed by the equality

$$H_s/H_{ci} = N_s/N_{ci}. \quad (14)$$

At the same time, the ratio of the current Brinell hardness value of cast iron or steel to the permissible value is proportional to the ratio of the current value of the surface-volume temperature of the friction lining (FK-24A material) and is expressed by the equation

$$H_{st}/H_{fl} = t_{st}/t_{fl} \quad (15)$$

Substituting into relation (14) we got $1.6 = 1.65$, and into the second (15) we have $0.376 = 0.375$.

Theoretical and experimental studies of the energy loading of friction pairs of various types of braking devices with the separation of

microprotrusion contact spots from them made it possible to establish the following: the presence of temperatures (flash, surface and volume) requires clarification that there is still a steady temperature and a thermal stabilization state of a metal friction element, when the temperature gradient over its thickness remains constant and minimal for some time; electrical and thermal processes on the contact patches of microprotrusions showed that the totality of temperatures and their gradients, depending on the work and friction power; the ratio of the hardness of steel according to Brinell to the same parameter for cast iron is inversely proportional to the ratio of the acting impulse normal forces on cast iron and steel is expressed by the equality $H_s/H_{ci} = N_s/N_{ci}$; at the same time, the ratio of the current Brinell hardness value of cast iron or steel to its allowable value is proportional to the ratio of the current value of the surface-volume temperature to the value of the allowable surface temperature of the friction lining (FK-24A material) and is expressed by the equation $H_{st}/H_{fl} = t_{st}/t_{fl}$; the introduction of the obtained data on the energy levels of spots of contacts of microprotrusions of friction pairs of brakes in the form of data will significantly improve their quality and significantly reduce the volume of tribotechnical studies.

Conclusions

The role of contacts of microprotrusions of brake friction pairs in the formation of their energy loading has been proved.

REFERENCES

1. **Kapralova N. F.** Choice of materials for friction pairs. *Higher Educational Head, Mechanical Engineering*, No. 12. M. Pp. 29-34 (*in English*)
2. **Volchenko N.A., Volchenko D.A., Juravlev D.Yu., Stefanik V.** Band-shoe brake devices, 2013. - 441p. (*in English*)
3. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Juravlev D.Y.** [and others]. Design and verification calculation of friction units of band-shoe brakes of drilling winches. Baku: *Apostrophe*, 2016. – 312 p. (*in English*)
4. **Landau L.D., Lifshits E.M.** Theory of elasticity. M.: *Nauka*, 1987. – 248 p. (*in English*)
5. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Juravlev D.Y.** [and others]. Disc and disc-shoe brakes in mechanical engineering. Volume 2. Baku: *Apostrophe-A*, 2021. - 392 p (*in Russian*)
6. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A.** [and others]. Tribology: friction, wear and lubrication. Baku: "Apostrophe - A", 2019. - 640 p (*in Russian*)
7. **Kindrachuk M.V., Volchenko D.A., Volchenko N.A., Stebeletskaya N.M., Voznyi A.V.** Influence of hydrogen on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units. *Mater. sci.* 2017, 53, 282-288 (*in English*)
8. **Kragelsky I.V.** Friction and wear. M.: *Mashinostroenie*, 1986. - 430 p. (*in English*)
9. **Michelich, J.L., Troiano A.R.** Delayed failure in hydrogenated facecentred cubic alloy in nickel. *Nature* 1963, pp. 996-997 (*in English*)
- 10 **Warren S.C., Voitchovsky K., Dotan H., Leroy S.M., Cornuz M., Stellacci F., Hebert C., Rothschild A., Grätzel M.** Identifying champion nanostructures for solar water-splitting. *Nat. mater.* 2013, 12, 842-849 (*in English*)
11. **Felton J., Blundo E., Ling S., Glover J., Kudrynskyi Z.R., Makarovskiy O., Kovalyuk Z.D., Besley E., Walker G., Polimeni A.** et al. The interaction of hydrogen with the Van der Waals crystal γ -InSe. *Molecules* 2020, 25, 2526 (*in English*)
12. **Mudd G.W., Svatek, S.A., Hague L., Makarovskiy O., Kudrynskyi Z.R., Mellor C.J., Beton P.H., Eaves L., Novoselov K.S., Kovalyuk Z.D.** et al. High broad-band photoresponsivity of mechanically formed InSe-graphene Van der Waals heterostructures. *Adv. mater.* 2015, 27, 3760-3766 (*in English*)
13. **Jamrozik A., Tutak W., Grab-Rogalski K.** Combusting stability, performance and emission characteristics of a CI engine fueled with diesel/n-butanol blends. *Energies*, 2021, 14.2817 (*in English*)
14. **Chichinadze A.V., Berliner E.M., Brown E.D.** et al. Friction wear and lubrication (tribology and tribotechnics). M.: *Mashinostroenie*, 2003. - 576 p (*in English*)
15. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Juravlev D.Y., Shasherina S.A., Romaniv N.N.** Ocenna energeticheskikh urovnej kontaktov i tribologicheskikh svojstv materialov par treniya. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2021, T.13, №4, c. 14-21 (*in Russian*)

Some Issues to Increase the Operational Efficiency of Multiphase Flow of Subsea Pipelines

G.G. İsmayılov¹, M.E. Shahlarlı², Sh.Z. İsmayılov³

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlıq ave. 20, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)

² "Oil Gas Scientific Research Project" institute (H. Zardabi st. 88 a, Baku, AZ 1012, Azerbaijan)

³ N. Narimanov OGPD (Neftchiler ave. 73, Baku, AZ 0033, Azerbaijan)

For correspondence:

Şahlarlı Mansur / e-mail: mansursahlarli1994@gmail.com

Abstract

The paper examines the problem in risers and in the case of multiphase flow due to the relief of the seabed, and shows the desirable and undesirable conditions in the curves rising from the seabed to the platform, ie in the elbow sections. The undesirable conditions that occur in the part of the pipe that rises to the platform, ie in the elbow sections of the vertical pipe, are shown mathematically. Due to the relief of the seabed, the accumulation of mechanical solids in the depressions of subsea pipelines between platforms and from the platform to the shoreline considering that it leads to the perforation of subsea pipelines and environmental pollution, in the latter part a technological scheme is proposed to prevent such cases. The technological scheme is simulated according to the results of laboratory analysis by Aspen HYSYS program and graphical dependences of various thermodynamic parameters were given.

Keywords: *riser, platform, condensate, mechanical particles, separator.*

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_74_80

Received 17.10.2021

Revised 21.06.2022

Accepted 23.06.2022

For citation:

Ismayılov G.G., Shahlarlı M.E., İsmayılov Sh.Z.

[Some issues to increase the operational efficiency of multiphase flow of subsea pipelines]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 74-80 (in Azerbaijani)

Multifazalı sualtı boru kəmərlərinin istismar səmərəliliyinin artırılmasının bəzi məsələləri

Q.Q. İsmayılov¹, M.E. Şahlarlı², Ş.Z. İsmayılov³

¹ Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ 1010, Azərbaycan)

² "Neftqazelmətdiqatlayihə" İnstitutu (Həsən bəy Zərdabi 88 a, Bakı, AZ 1012, Azərbaycan)

³ AzNEFT İB, N. Nərimanov NQÇI (Neftçilər prospekti 73, Bakı, AZ 0033, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Şahlarlı Mənsur / e-mail: mansursahlarli1994@gmail.com

Xülasə

Məqalədə dik borularda və dəniz dibinin relyefi ilə əlaqədar olaraq multifazalı axın zamanı yaranan problemlər araşdırılmış, dənizin dibindən stasionar özülə qalxan əyrilərdə, yəni əyribucaqlılarda araşdırırmalar nəticəsində arzuolunan və arzuolunmaz şərtlər göstərilmişdir. Borunun özülə qalxan hissəsində, yəni dik borunun dirsək hissələrində əmələ gələn arzuolunmaz halların riyazi təsviri verilmişdir. Dəniz dibinin relyefi ilə əlaqədar olaraq, özüllər arası və sahilə gedən su altı boru kəmərlərinin çökək hissələrində mexaniki bərk hissəciklərin toplanması sualtı boru kəmərlərinin deşilməsinə və ətraf mühitin çirkəlməsinə səbəb olduğunu nəzərə alaraq, sonuncu hissədə isə həmin halların qarşısını almaq üçün texnoloji sxem təklif olunmuşdur. Aspen HYSYS programı vasitəsilə laboratoriya təhlili nəticələrinə uyğun texnoloji sxemin simulyasiyası aparılmış və müxtəlif termodinamiki parametrlərin qrafiki asılılıqları verilmişdir.

Açar sözlər: dik boru, platforma, kondensat, mexaniki hissəciklər, separator.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_74_80

УДК: 542.73

О повышении эксплуатационной эффективности многофазных потоков подводных трубопроводов

Г.Г. Исмаилов¹, М.Э. Шахларлы², Ш.З. Исмаилов³

¹ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг 20, AZ1010, Баку, Азербайджан.)

² НИПИ Нефтегаз, (Г. Зардаи 88а. AZ1012, Баку, Азербайджан)

³ ПО АзНЕФТЬ, Н. Нариманов НГДУ (проспект Нефтияр 73, Баку, AZ 0033, Азербайджан)

Для переписки:

Шахларлы Мансур / e-mail: mansursahlarli1994@gmail.com

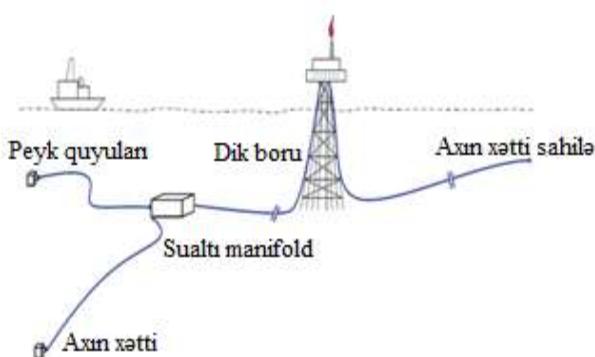
Аннотация

В статье первично исследованы проблемы, возникающие в мультифазном потоке, связанные с рельефом дна моря и в райзере, показаны желательные и нежелательные условия в коленах в местах подъёма трубопровода от дна на платформу. Рассмотрены нежелательные условия в местах подъёма трубопровода на платформу, т. е. в коленах райзера были показаны математически. Скопление твёрдых механических частиц в углублённых местах дна в подводных трубопроводах до берега или между платформами, связанное с рельефом морского дна, становится причиной прокалывания подводных трубопроводов и загрязнения окружающей среды. Для предотвращения таких случаев приведена технологическая схема, проведена симуляция данной схемы. С помощью программы Aspen HYSYS показаны графические зависимости различных термодинамических параметров, соответствующих результатам лабораторных анализов.

Ключевые слова: райзер, платформа, конденсат, механические частицы, сепаратор.

Giriş

Azərbaycan dəniz qaz-kondensat yataqlarından istehsal olunan qaz-kondensat qarışıqları (o cümlədən sulu, mexaniki hissəcikli) özüllərdə şaquli qravitasıya separatorlarında qaza və kondensata ayrılaraq müvafiq boru kəmərləri ilə nəql olunur. Qazın dəfələrlə separasiya olunmasına baxmayaraq, ölçüsü bir neçə mikrometr olan mexaniki bərk hissəciklər dibinə çökə bilmir və əksər hallarda qaz axını ilə aparılır. Nəticədə magistral qaz kəmərlə istehlakçıya verilən qazın tərkibində nəmlik və toz halında olan mexaniki bərk hissəciklərin miqdarı bəzi hallarda normadan xeyli artıq olur. Nəmliyin və mexaniki bərk hissəciklərin tutulması üçün kəmərin sonluğunda adətən süzgəcli separatorlar quraşdırılır və onların işinə daim nəzarət olunur. Nəticədə, gün ərzində separatorun süzgəci dəfələrlə təmizlənməyə və dəyişilməyə məruz qalır ki, bu da xeyli əmək sərfinə, vaxt itkisinə, separatorun işçi təzyiqində nominal həcmi qədər qazın atmosferə atılmasına və beləliklə ətraf mühitin çirkəlməsinə və karbohidrogenlərin itkisinə səbəb olur. Boru kəmərləri (və dik borular) neft yatağının qan damarlarıdır; dənizdəki karbohidrogen ehtiyatlarının istehsalında bir sıra məqsədlər üçün istifadə olunur (Şəkil 1) [1].



Şəkil 1 – Sualtı boru kəmərləri və dik boru sistemləri
Figure1 – Submarine pipelines and riser systems

Bundan əlavə özüllər arası su altı boru kəmərlərində dəniz dibinin kələ-kötür relyefi ilə əlaqədar olaraq, boru kəmərlərinin çökək hissələrində və dik boruların dəniz dibində özülə qalxan əyrilərində (dirsək hissələrində) multifazalı axın zamanı hər hansı bir texnoloji problem yaranarsa, mexaniki bərk hissəciklər dibə çökər və tixaclar yarana bilər. Sadaladığımız hallar baş verərsə, sualtı boru kəmərlərinin eroziya və korroziyası nəticəsində istismar müddəti azalar və ya deşilmələr nəticəsində, kəmərdə deşilmələr və yarıqlardan sisimlər baş verər.

Xüsusilə də nəql olunan multifazalı axınların tərkibində CO_2 və H_2S kimi korroziyanın sürətinin artmasına şərait yaradan aqressiv komponentlərin maddələrin olması arzuolunmaz texnoloji risklərin baş vermə ehtimalını daha da artırır.

İşin məqsədi

Sualtı boru kəmərlərində və dik borularda multifazalı axın zamanı istismar səmərəliliyinin araşdırılması və aparılmış laboratoriya sınaqlarının nəticələrinə uyğun olaraq, mexaniki hissəciklərin tutulması üçün tətbiq olunan texnoloji sxemin Aspen HYSYS programı vasitəsilə hesablanması.

Məsələnin qoyuluşu

Aparılan müşahidə və tədqiqatlar nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki “Günəşli” yatağında quyulardan çıxarılan hər litr mayenin tərkibində 0,01-0,4 mm ölçülərdə 0,5-4 q mexaniki qarışıqlar olur. Həmin mexaniki hissəciklərin boru kəmərlərində çökməsi nəticəsində avadanlıqların çirkəlməsi, onların istismar müddəti və istismar məhsuldarlığının azalması baş verir və əlavə xərclər yaranır.

Məlumdur ki, ümumiyyətlə ballastların – su, mexaniki qarışıqlar və duzlarının miq-

darına görə xam neftlərin tərkibi müxtəlidir. Bir çox hallarda neftlərin qarışması zamanı asfalten, parafin və qatranlarla yanaşı qeyd olunan ballastların da çökməsi baş verir [2].

Multifazalı quyu məhsullarının meydançalarası və sahilə nəqli zamanı boru kəmərlərinin kələ-kötürlü relyefli dəniz dibinin çökək yerlərində, eləcə də dənizin dibində özülə qalxan hissəsində su, parafinlər, mexaniki qarışıqlar və duz birləşmələri yığılır ki, bu da boru kəmərinin işçi en kəsiyinin azalmasına və nəticədə yığılan birləşmələrin mexaniki və kimyəvi təsirindən eroziya-korroziyaya uğramasına səbəb olur.

Klapanlar, çənlər, tutumlar, separatorlar və sairə kimi mekaniki statik avadanlıqlar fərqli növ bir korroziyaya qarşı həssasdır, ancaq boruxətləri multifazalı axında içindəki CO_2 , H_2S , H_2O , bakteriya, qum və sairə varlığından dolayı korroziyaya daha meyllidir [3]. Nəticədə materialın deqradasiyası güc, elastiliklik, zərbə gücü və sair kimi mexaniki xüsusiyyətlərin itirilməsinə səbəb olur [4]. Bu, material itkisinə, qalınlığın azalmasına və bəzən son uğursuzluğa səbəb olur [4].

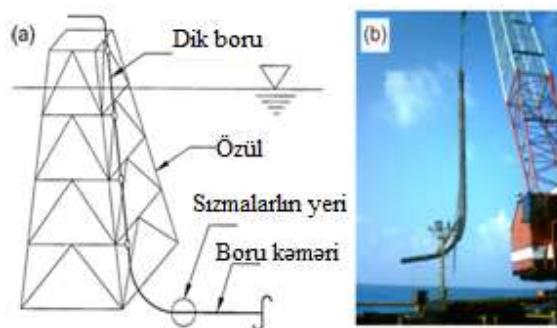
Müşahidələr nəticəsində neft üfüqi boru kəmərinin dibində, məhsul dirsəyə daxil olmadan bəzi neft sızıntılarının olduğu müəyyən edilmişdir (şək. 2) [5].

Problemin riyazi ifadəsi

Dik boruda təzyiqin riyazi olaraq ifadəsi aşağıdakı şəkil 3-ə əsasən belədir [6]:

$$P = \Delta P_h + \Delta P_s + \Delta P_a + \Delta P_k + \Delta P_s \quad (1)$$

ΔP_h - hidrostatik təzyiq; ΔP_s - sürtünmə təzyiqi; ΔP_a - təcil nəticəsində yaranan təzyiq; ΔP_k - klapanda təzyiq düşkübü; ΔP_s - seperatourun təzyiqi.



Şəkil 2 – a) sualtı boru kəməri dik boru konfiqurasiyasının sxematičeskaya diaqramma, (b) qəzaya uğramış sualtı boru kəmərinin görünüşü

Figure 2 – a) Schematic diagram of the subsea pipeline riser configuration, (b) view of the failed subsea pipeline

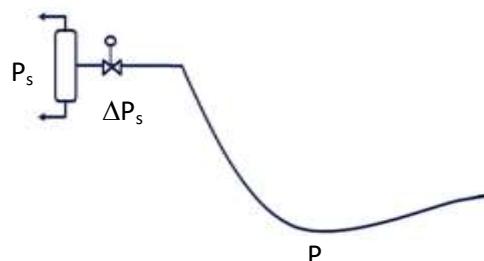


Figure 3 – Pipeline-riseconfiguration

Dik borudakı təzyiqin qazın sərfiyatına olan həssaslığı aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər [6].

$$\frac{dP}{dQ} = \frac{d\Delta P_h}{dQ} + \frac{d\Delta P_s}{dQ} + \frac{d\Delta P_a}{dQ} + \frac{d\Delta P_k}{dQ} + \frac{dP_s}{dQ} \quad (2)$$

Stabil vəzifyatda:

$$\frac{dP}{dQ} > 0 \quad (3)$$

Qeyri-stabil vəzifyatda:

$$\frac{dP}{dQ} < 0 \quad (4)$$

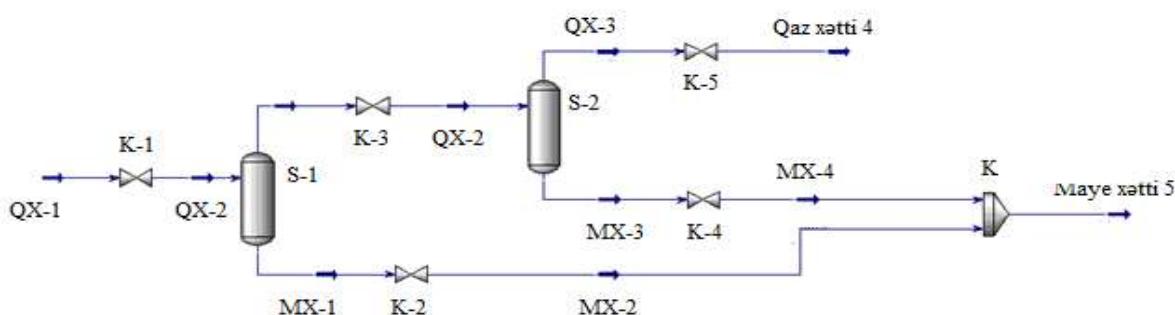
Texnoloji sxemin izahı

Qaz-kondensat quyularından çıxan məhsul ilkin separator (S-1) qurğusuna verilərək qaza və kondensata ayrıılır. Separatorda qazdan kondensatın daha yaxşı ayrılması üçün onun maye və qaz çıxışlarında tənzimləyici

klapanlar, gövdəsində isə çıxış kamerası quraqşdırılmışdır.

Çıxış kamerası içərisində nəzarət ölçü cihazı olaraq üzgəc quraşdırılır, onun vasitəsilə separator daxilində maye səviyyəsi təyin edilir. Maye çıxışındakı tənzimləyici klapan vasitəsilə separatorun daxilində maye səviyyəsi sabit saxlanılır. Belə ki, separatorda ayrılan kondensat və mexaniki qarşıq hissəcikləri drenaj çıxışından bilavasitə maye xəttinə vurulur. Separatorun dibində mexaniki hissəciklərin yiğilmasının qarşısı alınır. Nəticədə qaz mexaniki hissəcik və qarşıqlardan ayrıılır. La-

kin, ikinci SDÖ-yə gedən xəttə müəyyən miqdarda mexaniki hissəciklər ərsin buraxma kamerası ilə gətirilir, ona görə də istehlakçıya verilən qazın tam təmizlənməsi üçün yenidən separatora verilir. Burada qaz mexaniki qarşıq və kondensatdan tam ayrılır. Qaz birbaşa nəql xəttinə verilir (şəkil 4). QX - uyğun olaraq 1, 2, 3, 4-cü qaz xəttləridir; MX - uyğun olaraq 1, 2, 3, 4, 5-ci maye xəttləridir; K - uyğun olaraq 1, 2, 3, 4, 5 – klapanlardır; S-1, S-2 – uyğun olaraq birinci və ikinci özüllərdəki separatorlardır; K – kollektordur.



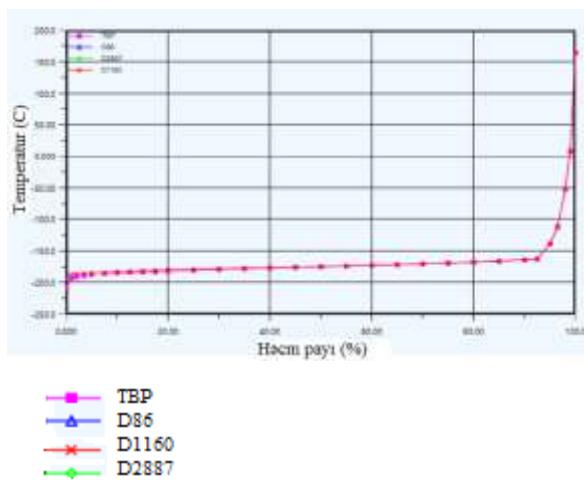
Şəkil 4 – Texnoloji sxemin Aspen HYSYS programında qurulması

Figure 4 – Creation of the technological scheme in the Aspen HYSYS software

Aspen HYSYS programında texnoloji sxemin qurulması və labaratoriya analizlərinin nəticələrinə əsasən simulyasiyanın aparılması və termodinamik parametrlərin qrafiki asılılıqlarının alınması.

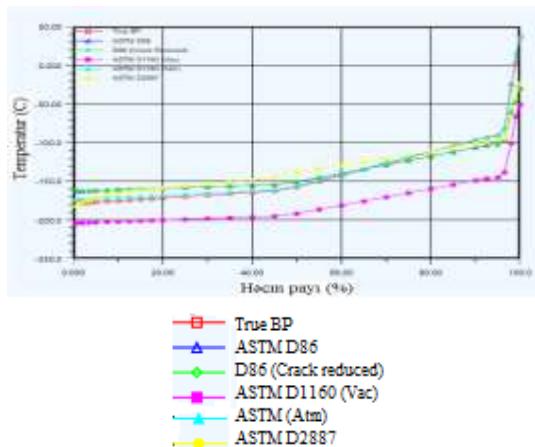
Göstərilən texnoloji sxemin Aspen HYSYS programında hesabatını aparmaq üçün aşağıdakı laboratoriya analizlərinin nəticələrinə uyğun maddələrin təzyiq, temperatur, sərfiyatı və mol fraksiyaları, uyğun olaraq cədvəl 1 və 2-də verilmişdir.

Nəticələrin qrafiki simulyasiyalarının qaz xətti 4 üçün təyini və termodinamiki parametrlərin qrafiki asılılıqları aşağıda (şəkil 5, 6, 7) göstərilmişdir.



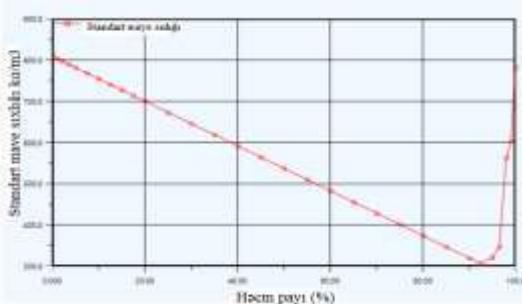
Şəkil 5 – Qaz xətti 4 üçün temperaturun həcmindən asılılığı (%-lə)

Figure 5 – Temperature & Volume percent for gas line 4 (%)



Səkil 6 – Qaz xətti 4 üçün temperaturun həcm payından asılılığı (%-lə)

Figure 6 – Temperature & Volume percent relationship for gas line 4



Səkil 7 – Qaz xətti 4 üçün standart maye sıxlığının həcm payından asılılığı (%-lə)

Figure 7 – Standart liquid density & Volume percent (%)

Nəticə

Aparılmış tədqiqatlar nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, dik borularda hər hansı bir arzuolunmaz hal baş verərsə, məhsulun tərkibindəki mexaniki bərk hissəciklər sualtı boru kəmərinin dibinə çökür və nəticədə boru kəmərinin daralmasına və deşilməsinə səbəb olur. Nəticədə, yaranan deşiklərdən sızmalar baş verir və ətraf mühitin çirkənməsinə səbəb olur.

Drenaj xəttinin nəql xəttinə birləşdirilməsi nəticəsində mexaniki bərk hissəciklərin separatorun dibində çöküb qalmasının qarşısı alınmışdır. Bunun nəticəsində separatorun tez sıradan çıxmasının qarşısı alınır və istismar müddəti uzanır.

Qazın mexaniki hissəciklər və kondensatdan tam təmizlənməsi üçün yenidən ikinci SDÖ-yə göndərilir, burada istehlakçıya verilən qaz mexaniki bərk və maye hissəciklərindən tam ayrılır.

İlkin verilənlər program vasitəsilə hesablanmış və qazın təmizlənməsinə verilən texnoloji sxem vasitəsilə tam nail olunması göstərilmişdir. İlkin verilən parametrlərə uyğun olaraq qrafiki simulyasiyalar göstərilmişdir.

Cədvəl 1 – Temperatur, təzyiq və sərfiyyatın hesabatı üçün qaz xətti 1-ə daxil edilməsi
Table 1 – Inclusion of temperature, pressure and molar flow to gas line 1 for calculation

Axinın adı	Qaz xətti 1	Buxar fazası	Maye fazası
Buxar/faza fraksiyası	0.9905	0.9905	0.0095
Tempratur (C)	32.10	32.10	32.10
Təzyiq (atm)	40	40	40
Molyar sərfiyyat (kq mol/saat)	2567	2543	24.46
Kütłə sərfiyyatı (ton/gün)	1105	1047	58.04
Standart ideal maye həcmi (m ³ /saat)	142.9	139.5	3.463
Molyar entalpiya (kC/kq mol)	-7.776e+0.004	-7.636e+0.004	-2.233e+0.005
Molyar entropiya (kC/mol C)	153.7	153.7	159.6
İstilik axını (kC/saat)	-1.996e+0.008	-1.941e+0.008	-5.464e+0.006
Maye həcmi standart şəraitdə (m ³ /gün)	1.452e+0.006	1.439e+0.006	81.45

Cədvəl 2 – Maddələrin mol fraksiyalarının hesabat üçün proqrama daxil edilməsi
Table 2 – Inclusion of mole fractions of substances to the program for reporting

Maddələr	Mol fraksiyaları	Buxar fazası	Qaz fazası
Azot	0.0078	0.0079	0.0005
Karbon dioksid	0.0015	0.0015	0.0006
Hidrogen sulfid	0.0000	0.0000	0.0000
Metan	0.9470	0.9545	0.1661
Etan	0.0212	0.0212	0.0165
Propan	0.0065	0.0064	0.0150
i-butan	0.0015	0.0014	0.0075
n-butan	0.0026	0.0025	0.0173
i-pentan	0.0012	0.0011	0.0163
n-pentan	0.0010	0.0008	0.0169
n-heksan	0.0015	0.0010	0.0542
n-heptan	0.0023	0.0010	0.1399
n-oktan	0.0020	0.0004	0.1643
n-nonan	0.0007	0.0001	0.0661
H ₂ O	0.0000	0.0000	0.0000
C10+qaz-1*	0.0032	0.0002	0.3188

REFERENCES

1. **Esmaeil Jahanshahi.** Control Solutions for Multiphase Flow Linear and nonlinear approaches to anti-slug control, Trondheim, October 2013. (*in English*)
2. **Ismayılov G.G., Adigozalova M.B., İsmayılova F.B., Zeynalova G.A.** Study of the effect of ballast on the macroscopic parameters of oil mixtures // *Herald of Azerbaijan Engineering Academy*, vol. 12, №1, 2020. (*in English*)
3. **Chinedu I. Ossai.** Advances in Asset Management Techniques: An Overview of Corrosion Mechanisms and Mitigation Strategies for Oil and Gas Pipelines, Vol. 2012. ArticleID 570143. <https://doi.org/10.5402/2012/570143> (*in English*)
4. **Lekan Taofeek Popoola, Alhaji Shehu Grema, Ganiyu Kayode Latinwo, Babagana Gutti & Adebori Saheed Balogun.** Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, Published: 27 September 2013. (*in English*)
5. **Ilman M.N., Kusmono.** Analysis of internal corrosion in subsea oil pipeline, 2013 (*in English*)
6. **Adegboyega Bolu Ehinmowo, Yi Cao.** Stability analysis of slug flow control, Published online: 31 Jul. 2016. (*in English*)

Synthesis and Physico-Chemical Study of Supramolecular Compounds Sm and Gd (III) with Terephthalic Acid

S.R. Mammadova

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry acad. M. Nagiyev, National Academy of Sciences of Azerbaijan (H. Javid ave. 113, Baku, AZ1143, Azerbaijan)

For correspondence:

Mammadova Sabina / e-mail: sb_mamedova@mail.ru

Abstract

The paper provides newly synthesized complexes of samarium and gadolinium (III) with terephthalic acid examined by X-ray, elemental, IR spectroscopic and derivatographic analysis. Based on the results obtained, the chemical formulas of the complexes, the form of coordination of p-phtahalic acid, as well as the processes of thermal decomposition and the formation of isostructural supramolecular coordination compounds are established. It is also found that, despite the same compositions and structures, the thermal decomposition of these compounds is not lonely, which is explained by the nature of the metals and the stereochemistry of the ligands.

Keywords: complexes, lanthanides, p-phtahalic acid, isostructure, molecular compounds, polymeric porous structure.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_81_88

Received 14.10.2021
Revised 21.06.2022
Accepted 19.06.2022

For citation:

Mammadova S.R.

[Synthesis and physico-chemical study of supramolecular compounds Sm and Gd (III) with terephthalic acid]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 81-88 (in Russian)

Sm və Gd (III) tereftal turşusu ilə supramolekulyar birləşmələrinin sintezi və fiziki-kimyəvi tədqiqi

S.R. Məmmədova

AMEA-nın M. Nağıyev adına Kataliz və Qeyri-üzvi Kimya İnstitutu (H. Cavid pr. 113, AZ1143, Bakı, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Məmmədova Səbinə / e-mail: sb_mamedova@mail.ru

Xülasə

Samarium və gadoliniumun (III) tereftal turşusu ilə yenidən sintez edilmiş kompleksləri rentgen, element, İQ-spektroskopik və derivatografik analizləri vasitəsilə tədqiq edilmişdir. Əldə olunan nəticələrə əsasən komplekslərin kimyəvi formulu, tereftal turşunun koordinasiya forması, həmçinin termiki parçalanma və izoquruluşlu supramolekulyar koordinasion birləşmələrin əmələgelməsi müəyyənləşdirilmişdir. Bu birləşmələrin tərkibinin və quruluşunun eyni olmasına baxmayaraq, termiki parçalanması fərqli gedir, bu da metalların xarakteri və liqandların stereokimiyası ilə izah olunur.

Açar sözlər: komplekslər, lantanidlər, tereftal turşusu, izostruktur, molekulyar birləşmələr, polimerməsaməli quruluş.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_ 81_88

УДК: 541.49:544.35

Синтез и физико-химическое исследование супрамолекулярных соединений Sm и Gd (III) с терефталевой кислотой

С.Р. Мамедова

Институт катализа и неорганической химии им. акад. М. Нагиева НАН Азербайджана (пр. Г. Джавида, 113 AZ1143, Баку, Азербайджан)

Для переписки:

Мамедова Сабина /e-mail: sb_mamedova@mail.ru

Аннотация

В статье приводятся результаты изучения вновь синтезированных комплексов самария и гадолиния (III) с терефталевой кислотой методами рентгенографического, элементного, ИК-спектроскопического и дериватографического анализа. Установлены химические формулы комплексов, форма координации терефталевой кислоты, а также процессы термического разложения и формирования изоструктурных супрамолекулярных координационных соединений. Также установлено, что, несмотря на одинаковые составы и структуры, термическое разложение этих соединений происходит неодинаково, что объясняется характером металлов и стереохимией лигандов.

Ключевые слова: комплексы, лантаниды, терефталевая кислота, изоструктура, молекулярные соединения, полимерная пористая структура.

Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ) и их соединения находят широкое применение в различных областях науки, техники и производства [1, 2]. Особый интерес представляют комплексные соединения РЗЭ (III) с органическими лигандами, которые используются в радиоэлектронике, в создании квантовых генераторов, в качестве люминофоров, в аналитической химии при создании новых физико-химических методов анализа. В биологии использование таких соединений позволяет исследовать процессы метаболизма и обмена веществ. Кроме того, синтез и исследование таких комплексных соединений представляет определенный теоретический интерес в связи с изучением их строения и способа координации.

Систематическое изучение комплексов РЗЭ с монокарбоновыми кислотами, в частности с бензойной кислотой и ее производными, с азотсодержащими гетероциклическими соединениями, а именно с 1,10-фенантролином и 2,2¹-дипиридином, с основанием Шиффа начато довольно давно [3–7]. Однако в литературе данных о структуре этих соединений мало, что, по нашему мнению, связано с трудностями получения монокристаллов. Имеются сведения только для нескольких соединений РЗЭ с бензойной кислотой и ее производными: неодима и гадолиния с 2,2¹-дипиридином, неодима и европия с 1,10-фенантролином и 2,2¹-дипиридином [3–6, 8, 9]. На основании этих исследований сделан вывод, что комплексы Nd и Eu с 1,10-фенантролином и 2,2¹-дипиридином изоструктурны.

Также изучены разнолигандные координационные соединения лантаноидов с 1,10-фенантролином, 2,2¹-дипиридином и

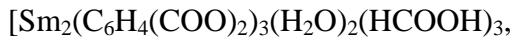
салициловой кислотой; предложено строение, показанное в [10].

Для подтверждения предложенного строения разнолигандных комплексов был выполнен квантово-химический расчет гипотетических комплексов, которые выбраны в качестве модельных соединений:
 $\text{La}(\text{L}^1)_2(\text{NO}_3)_3$ и $\text{LaL}^1\text{HL}^4(\text{NO}_3)_2$,
где L^1 – 1,10-фенантролин; HL^4 – салициловая кислота.

На основании квантово-химического расчета получены расчетные данные межатомных расстояний и зарядов атомов для модельных соединений и разнолигандного комплекса $\text{LaL}^1\text{HL}^4(\text{NO}_3)_2$. Также ранее нами были синтезированы комплексные соединения самария, неодима и гадолиния с *o*-фталевой кислотой с химической формулой



и клатратные соединения



Анализ литературного материала показывает, что особый интерес представляют комплексы РЗЭ (III) с ароматическими двухосновными кислотами, в частности с *o*- и *p*-фталевыми кислотами.

Целью данной работы является синтез и физико-химическое исследование новых представителей РЗЭ с органическими лигандами, в частности с терефталевой кислотой.

В работе использованы методы исследования: элементный и рентгенофазовый анализ, методы ИК-спектроскопии и термогравиметрии.

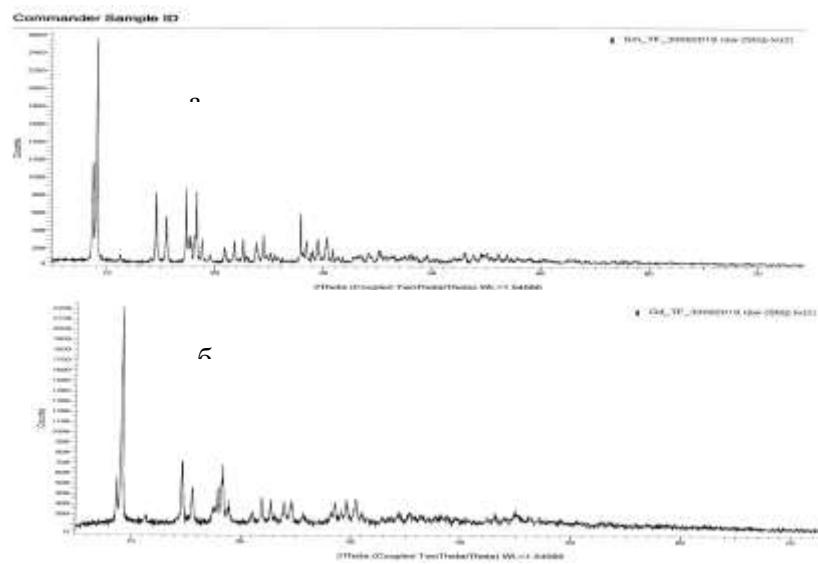


Рисунок 1 – Дифрактограмма комплексного соединения самария (а) и гадолиния (б) с терефталевой кислотой
Figure 1 – Diffraction pattern of a complex compound of samarium (a) and gadolinium (b) with terephthalic acid

Обсуждение результатов

Сопоставление рентгенограмм синтезированных соединений представлено на рис. 1, а, б. Анализ рентгенограмм показал, что полученные соединения состоят из одной фазы и высококристалличны. Распространение пиков по всей дифрактограмме означает, что соединения имеют высокую симметрию и параметры элементарных ячеек приблизительно 10.03; 9,70; 6.06 Å и 10.11; 9.63; 6.03 Å и хорошо идентифицируются под указанными максимумами. Как видно из указанных дифрактограмм и параметров элементарных ячеек, они идентичны и, видимо, изоструктурны.

Элементные составы синтезированных образцов комплексных соединений представлены в таблице.

По результатам химического элементного анализа был сделан вывод, что составы полученных соединений отвечают гексааква-тритерефталато-дисамария и гексааква-тритерефталато-дигадолиния (III) и хорошо согласуются с результатами рентгенографических анализов. Важно отметить, что проведенные нами ранее исследования показали, что *n*-фталаты самария и гадолиния неизоструктурны и по всем параметрам отличаются друг от друга [11, 12]. Это, скорее всего, непосредственно зависит от стереохимии кислот.

Таблица – Результаты элементных анализов образцов синтезированных продуктов
Table – Results of elemental analyzes of samples of synthesized products

Соединения	Брутто-формула	Содержание (найдено/ вычислено), %		
		Sm, Gd	C	H
Sm ₂ (n-C ₆ H ₄ (COO) ₂) ₃ (H ₂ O) ₆	Sm ₂ C ₂₄ H ₂₄ O ₁₈	32.95/33.37	31.68/31.99	2.49/2.68
Gd ₂ (n-C ₆ H ₄ (COO) ₂) ₃ (H ₂ O) ₆	Gd ₂ C ₂₄ H ₂₄ O ₁₈	33.96/34.37	31.22/31.51	2.39/2.64

ИК-спектроскопические исследования комплексных соединений показывают, что в ИК-спектрах, соответственно в областях 1585–1463, 1532–1377 и 1505–1308 cm^{-1} и 1586–1424, 1540–1311 и 1505–1311 cm^{-1} появляются четкие полосы, которые относятся к асимметричным (V_{as}) и симметричным (V_s) полосам поглощения карбоксильных групп терефталатных дианионов [13]. Разницы между V_{as} и V_s , которые, соответственно, составляют 122, 155 и 197 cm^{-1} и 162, 229 и 194 cm^{-1} , показывают, что карбоксилатные анионы терефталатных кислот имеют хелатную функцию [14].

Как видно из рис. 2, *a*, *b*, в ИК-спектрах имеются широкие полосы, соответственно в областях 3200–3600 cm^{-1} (макс. 3451 cm^{-1}) и 3200–3600 cm^{-1} (макс. 3461 cm^{-1}), относящиеся к молекулам воды.

В ИК-спектрах обнаружены также полосы при 1608,23 и 1608,57 cm^{-1} , отвечающие деформационным колебаниям молекул воды (HOH), что подтверждает наличие кристаллизационной воды.

Для определения количества воды, температуры и характера дегидратации, термической деструкции проведен термографический анализ комплексных соединений в температурной области 20–1000 $^{\circ}\text{C}$, (скорость нагревания 10 $^{\circ}/\text{мин}$, эталон Al_2O_3).

Из представленных на рис. 3, *a* и *b* дериватограмм комплексных соединений видно, что, несмотря на изоструктурность и одинаковый химический состав, термическая деструкция комплексов протекает различно. Так, на кривой ДТА комплексного соединения самария наблюдаются два эндотермических эффекта с максимумами при 108,2 $^{\circ}\text{C}$ и 248,1 $^{\circ}\text{C}$, при которых удаляются 4,9% и 7,9% массы, соответственно. Эти массы соответствуют 2 и 4 молекулам H_2O . Это означает, что молекулы воды из кристаллической решетки удаляются в две стадии.

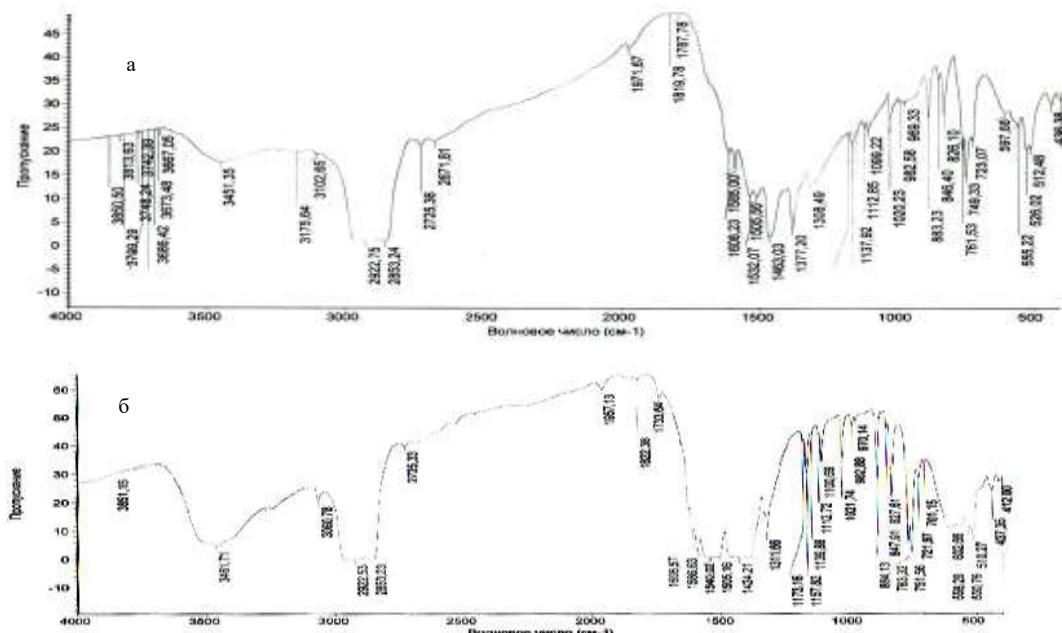


Рисунок 2 – ИК-спектры комплексного соединения самария (а) и гадолиния (б) с терефталевой кислотой

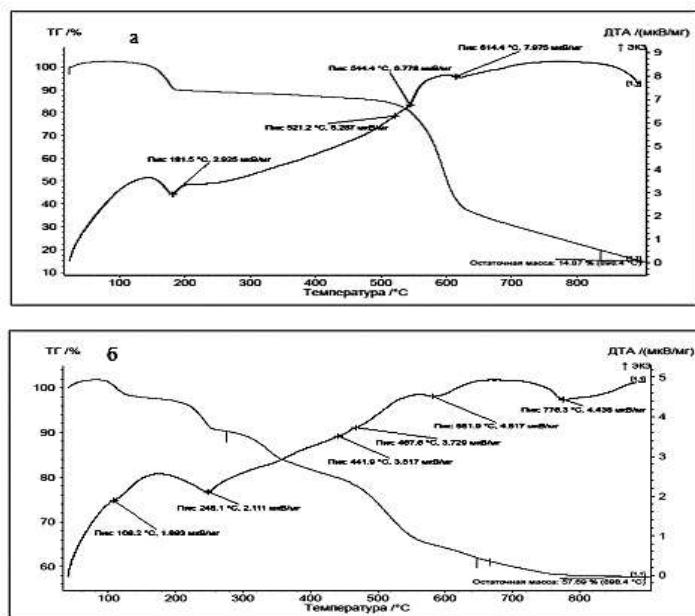


Рисунок 3 – Дериватограмма комплексного соединения самария (а) и гадолиния (б) с терефталевой кислотой
Figure 3 – Derivatogram of a complex compound of samarium (a) and gadolinium (b) with terephthalic acid

В случае гадолинового комплекса такое же количество воды из кристаллической решетки удаляется в одну стадию с максимумом четкого эндотермического эффекта при 181^0C . Это, по-видимому, обусловлено природой металла и их кристаллографической позицией в структуре.

Безводные продукты комплексных соединений устойчивы до температур 280 и 500^0C , после чего начинается разложение безводных продуктов комплексных соединений в температурных интервалах 280 - 776^0C и 500 - 898^0C , соответственно.

Как видно из кривой ДТА, разложение безводных продуктов и выгорание органических остатков также происходит своеобразно. Разложение безводного продукта комплекса самария происходит без какого-либо эндотермического эффекта – сразу начинается выгорание органической части комплекса, и этот процесс сопровождается широким экзотермическим эффектом в температурном интервале 280 - 898^0C , а разложение безводного продукта ком-

плексного соединения – гадолиния сопровождается нечетким эндотермическим эффектом с максимумом 540^0C . Слишком высокая температура не дает ему до конца формироваться и перекрывается экзотермическим эффектом, который появляется за счет выгорания органического остатка. В этом случае выгорание органического остатка идет гораздо быстрее по сравнению с комплексным соединением самария. При этом потеря массы составляют $49,16\%$ (выч. $49,27\%$) и $48,77\%$ ($48,55\%$), соответственно. Конечными продуктами термолиза являются Sm_2O_3 и Gd_2O_3 , соответственно.

Таким образом, комплексными физико-химическими исследованиями выявлено, что координационное число каждого центрального атома 9 , и это объясняется участием в образовании связей f-орбиталей. А – координационный полиздр-девятивершинник. Также установлено, что полученные комплексные соединения имеют, соответственно, химические формулы:



и



и изоструктурны. В координационное окружение металлов входят шесть атомов кислорода трех карбоксилатных групп дианиона, три атома кислорода и три молекулы воды.

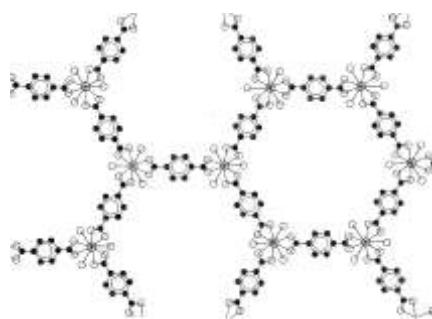


Рисунок 4 – Предполагаемая схематическая структура комплексного соединения самария и гадолиния с терефталевой кислотой

Figure 4 – Supposed schematic structure of the complex compound of samarium and gadolinium with terephthalic acid

На основании полученных результатов приведена предполагаемая схематическая полимерно-слоистая структура комплексных соединений (рис. 4). В структуре образуются колонки, имеющие форму правильного шестиугранника с диаметром $\approx 20\text{\AA}$. Предполагаем, что координационно связанные молекулы воды участвуют в формировании внутри- и межслоистой сети водородных связей и таким образом 2D структура превращается на 3D структуру и супрамолекулу.

Экспериментальная часть

Рентгенофазовый анализ проводили на приборе Commander Sample ID (Coupled Two Theta) с медным катодом. ИК-спектры поглощения снимали на спектрометре Nicole 1810 фирмы Thermo Scientific, в об-

ласти $400\text{--}4000\text{cm}^{-1}$. Образцы готовили в виде суспензий в вазелиновом масле при комнатной температуре. Дериватограммы записывались на дериватографе STA-449, F-3 (ФРГ). Элементный анализ на С, Н выполнен на анализаторе CHNSO«E» фирмы CarloERBA. Содержание металлов рассчитывали из кривой потери массы по количеству оксидов, полученных после нагревания на дериватографе до 900^0C .

Синтез комплексных соединений

Для синтеза комплексных соединений использовали $\text{SmCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 «хч» и терефталевую кислоту «хч». Взвешивали две навески терефталевой кислоты по 0,498 г (0,003 моль) и каждую растворяли в 50 мл дистиллированной воды с прибавлением к каждой 0,504 г (0,006 моль) NaHCO_3 . К полученным горячим растворам постепенно прибавляли 0,729 г (0,002 моль) и 0,743 г (0,002 моль) водорастворимых солей $\text{SmCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, соответственно. Отфильтрованные осадки сначала промывались несколько раз дистиллированной теплой водой, а потом бензолом, и высушивались вначале на воздухе, а затем в сушильном шкафу при 50^0C . Поликристаллические порошки имеют желтоватый цвет.

Заключение

Впервые синтезированы комплексы самария и гадолиния с терефталевой кислотой и установлено, что, в отличие от фталевой кислоты, они образуют изоструктурные комплексы. Рядом физико-химических исследований установлен их состав и химическая формула. Предложена предполагаемая схематическая структура синтезированных комплексных соединений.

REFERENCES

1. Petrochenkova N.V., Mirochnik A.G. Lyuminescentnye hemosornye svojstva kompleksnyh soedinenij Eu (III). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020. 128 (1):140 (*in Russian*)
2. Filho M., Dutra J., Cavalcanti H., Rocha G., Simas A., Freire R. The crystal and molecular structure of terephthalic acid. *Journal Chem. Theor. Comput.* 2014. V.10(8). P.3031-3037 (*in English*)
3. Hiyalov M.S., Amiraslanov I.R., Mamedov H.S., Movsumov E.M. Kristallicheskaya i molekuljarnaya struktura n-aminobenzoata neodima (III). *Zhurnal strukturnoj himii*. 1981. T.22. №3. S. 113-119 (*in Russian*)
4. Hiyalov M.S., Amiraslanov I.R., Mamedov H.S., Movsumov E.M. Kristalliceskaya I molekuljarnaya struktura para-nitrobenzoata disproziya (III). *Koordinacionnaya himiya*. 1981. T.7. №3. S. 445-449 (*in Russian*)
5. Efremova G.I., Buchkova R.T., Lapichkaya A.V., Aprkes S.B. Kristalliceskaya i molekuljarnaya struktura kompleksa medi s 1,2,4,5- benzoltetrakarbonovoy kislotoj. *Koordinacionnaya himiya*. 1977. T. 22. №4. S. 948-953 (*in Russian*)
6. Gostincev V.V., Valcev V.K., Balashevskij G.F. Obrazovaniye kanalnix soedineniy vklyuceniya. *Zhurnal neorganicheskoy himii*. 1976. T.21. №8. S. 2030-2034 (*in Russian*)
7. Kindu M.F.A. Koordinacionnye soedineniya RZE (III) s nekotorymi azotsoderzhashchimi geterociklicheskimi ligandami. *Aktualnye problemi gumanitarnyh i estestvennyh nauk*. 2011. №8(31). S. 20-23 (*in Russian*)
8. Kindu M.F.A., Venkovskij N.U., Tamurova T.S., Shalneva E.P. Sintez i issledovanie koordinacionnyh soedinenij nekotoryh lantanoidov s osnovaniem Shiffa. XXV Mezhdunarodnaya Chugaevskaya konferenciya po koordinacionnoj himii .II Molodezhnaya konferenciya-shkola. «Fiziko-himicheskie metody himiikoordinacionnyh soedinenij» Suzdal, 6-11 iyunya 2011, Tezisy dokladov. S. 245-246 (*in Russian*)
9. Aliyeva F.B., Usubaliyev B.T., Munshiyeva M.K., Murvatov F.T., Jalaladdinov F.F., Mamedova Z.A., Safarova P.S. Sintez I fiziko-ximiceskiye issledovaniya kompleksnogo soedineniya monoakvatribenzoata-monojeleza (III). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. Vol.7, №2. 2015. Pp. 82-89 (*in Russian*)
10. Kindu M.F.A. Sintez i issledovanie raznoligandnyh kompleksnyh soedinenij RZE (III) s 1, 10-fenantrolinom i salicilovoj kislotoj. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzhya*. Sbornik nauchnyh statej. Kazan. 2011.№6. S. 76-79 (*in Russian*)
11. Usubaliyev B.T., Shabanov A.L., Gasanova U.A., Munshiyeva M.K. Formiation of inclusion compound of Samarium dihidro complex with 1,2-benzenedicarboxilic asid. *Journal of Qafqaz university-chemistry and biology*. 2014. V.2. №1. Pp. 90-95. (*in Russian*)
12. Munshiyeva M.K., Usubaliyev B.T., Aliyeva F.B., Mamedova S.R., Jalaladdinov F.F. Complexes of rare earth metals with 1,2-benzene dicarboxylic (o-phthalic) acid. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2016. №3. Pp. 130-139 (*in English*)
13. Nakamoto K. IK-spektry I spektry KR neorganicheskikh I koordinacionnyh soedinenij. M.: Mir, 1991.S. 318 (*in English*)
14. Bellami L. Novie danniye po IK-spektram slozhnikh molekul. M.: Mir. 1971. 505 s. (*in Russian*)

Issues of Time Change Forecasting of the Total Delay of GPS Signals

R.A. Eminov

Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave. 20, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

For correspondence:

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Abstract

A normalized mathematical model of tropospheric refractivity is proposed. An analytical expression is obtained for calculating the quantity of the partial pressure of water vapor, at which the total delay reaches a minimum value. On the basis of the available factual material, an experimental confirmation of the presence of a minimum of the total tropospheric delay predicted due to the proposed model is found.

Keywords: GPS signal, total delay, wet delay, dry delay, refractivity, forecast.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_89_94

Received 17.02.2022
Revised 17.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Eminov R.A.

[Issues of time change forecasting of the total delay of GPS signals]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 89-94 (in Azerbaijani)

GPS-siqnalların cəm gecikməsinin zaman dəyişməsinin proqnozu məsələsi

R.Ə. Eminov

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Eminov Ramiz / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Xülasə

Məqalədə troposfer refraktivliyinin normalaşmış riyazi modeli təklif edilmişdir. Su buxarlarının parzial təzyiqinin hesablanması üçün cəm gecikməni minimal qiymətə çatdırıran analitik ifadə alınmışdır. Əldə edilmiş faktiki material və təklif olunmuş model əsasında proqnozu verilmiş cəm troposfer gecikməsinin minimuma çatdırılması mümkünluğunun eksperimental təsdiqi aşkar olunmuşdur.

Açar sözlər: GPS-signal, cəm gecikmə, rütubət gecikməsi, quru gecikmə, refraktivlik, proqnoz.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_89_94

УДК: 528.4, 528.856

Вопросы прогноза временного изменения суммарной задержки GPS-сигналов

P.A. Эминов

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

Для переписки:

Эминов Рамиз / e-mail: eminovramiz@mail.ru

Аннотация

Предложена нормированная математическая модель рефрактивности тропосферы. Получено аналитическое выражение для вычисления значения парциального давления водяных паров, при котором суммарная задержка достигает минимальной величины. На базе имеющегося фактического материала обнаружено экспериментальное подтверждение наличия минимума суммарной тропосферной задержки, предсказанной на основе предложенной модели.

Ключевые слова: GPS-сигнал, суммарная задержка, влажная задержка, сухая задержка, рефрактивность, прогноз.

Giriş

Məlumdur ki, GPS mövqetəyinətmə sistemlərdə səhvlerin yaranmasının əsas səbəblərindən biri də troposferin adekvat modelinin olmamasıdır. İş [1]-də qeyd olunduğu kimi adı halda zenit istiqamətində troposfer səhvi 2,5 m bərabərdir. Bu səhv iki tərkibdən ibarətdir: “rütubətli” və “quru”. Quru tərkib cəm gecikmənin təqribən 90%-ni təşkil edir və o, sabit olaraq, öncədən asanlıqla tapılı bilər. Ancaq rütubət tərkibi öz yüksək zaman dəyişkənliliyilə fərqlənir. Belə ki, “rütubət” komponenti tropik zonada zenit istiqamətində 40 mm çata bilər.

[2, 3]-cü işlərdə qeyd olunduğu kimi, hətta qısa bazis məsafəli differential GPS sistemlərdə troposferin qeyri sabitliyi mövqetəyinətmənin gözəçarpan qədər səhvinə gətirib çıxara bilər.

İş [4]-də yağışın GPS mövqetəyinətmə sistemlərinin keyfiyyətinə etdiyi təsirinin kompleks qiymətləndirilməsi məsələsinə baxılıb, yağışla bağlı əsas amillər təhlil olunub və nəticədə onların neqativ təsirinin öyrənilməsi üçün yanaşma yolları göstərilib.

Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, onda bu məsələnin aşağıdakı alternativ qoyuluşunu aktual hesab etmək olar [5]:

1. Troposferin fiziki parametrlərinin ayrı-ayrılıqda modellərinin əvəzinə, cəm zaman gecikməsinin zamanla dəyişməsinin riyazi modelini yaratmaq, yaxud da formalasdırmaq.

2. GPS-siqnalların cəm troposfer gecikməsinin zamanla dəyişməsinin öncədən deməsi mümkünluğunun tədqiqi məsəlesi.

Şübhəsiz ki, cəm troposfer gecikməsinin zamanla dəyişməsinin adekvat riyazi modelini yaratmaq üçün həmin gecikmənin ayrı-ayrı tərkibləri və xüsusən də zaman dəyişmələri təhlil olunmalıdır.

Məsələnin həlli

İş [3]-də göstərildiyi kimi, müəyyən t zaman anında ZHD zenit hidrostatik gecikməsi bu cür təyin olunur

$$ZHD(t) = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_d(t) dh, \quad (1)$$

burada $N_d(t)$ - cəm refraktivliyin hidrostatik komponentinin qiymətidir; h_s - yer səthinin yüksəkliyidir.

ZWD zenit rütubət gecikməsi bu cür təyin olunur

$$ZWD(t) = 10^{-6} \int_{h_s}^{\infty} N_w(t) dh. \quad (2)$$

Bu zaman cəm refraktivliyin hidrostatik və rütubət komponentləri bu cür təyin olunur

$$N_d = \frac{k_1 \rho(t) R_0}{M_d}, \quad (3)$$

$$N_w = \left[k'_2 \frac{e(t)}{T(t)} + k'_3 \frac{e(t)}{T^2(t)} \right] \cdot Z_w^{-1}, \quad (4)$$

burada $k_1 = 77,6 \pm 0,05$ (K/ГПа); $\rho(t)$ - quru və rütubətli havanın cəm sıxlığıdır ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$); R_0 - universal qaz tərkibidir, ($\text{Д}\cdot\text{мол}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); M_d -quru havanın molyar çəkisidir, ($\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$).

$$k'_2 = \left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right),$$

burada $k_2 = 70,4 \pm 2,2$ (K/ГПа); $k_1 = 77,6 \pm 0,5$ (K/ГПа); M_w - rütubətli havanın molyar çəkisidir, ($\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$); $e(t)$ - su buxarlarının parsial təzyiqidir; $T(t)$ - hərarətdir (K); $k_3 = (3,739 \pm 0,02) \cdot 10^5$ (K 2 /ГПа); Z_w^{-1} - su buxarının inversli sıxlılma əmsalıdır,

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \frac{e(t)}{T^3} (1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3)$$

burada T_c - hərarətdir, °C.

(1)-ci ifadəyə görə aşağıdakı bərabərliyi alırıq:

$$k_1 \left[\frac{\rho(t)R_0}{M_d} - \frac{e(t)}{T} Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} \right] = \frac{k_1 P_d(t)}{T} \cdot Z_d^{-1}. \quad (5)$$

burada P_d - quru havanın parsial təzyiqidir.

$$N = \frac{k_1 P_d(t)}{T} \cdot Z_d^{-1} + k_2 \frac{e(t)}{T} \cdot Z_w^{-1} + k_3 \frac{e(t)}{T^2} \cdot Z_w^{-1}, \quad (6)$$

burada Z_d^{-1} - quru havanın inversli sıxılma əmsalıdır,

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57,97 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_c}{T^2} \right].$$

Aşağıdakı ifadəni nəzərə alsaq

$$P_d(t) = P(t) - e(t), \quad (7)$$

burada $P(t)$ - cəm təzyiqidir; P_d - quru havanın parsial təzyiqidir.

(7)-ci ifadədən aşağıdakını alırıq:

$$\begin{aligned} N &= \frac{k_1 [P(t) - e(t)] \cdot Z_d^{-1}}{T} + e(t) Z_w^{-1} \left(\frac{k_2}{T} + \frac{k_3}{T^2} \right) = \frac{k_1 [P(t) - e(t)] \cdot Z_d^{-1}}{T} + \\ &+ \left[e(t) + \frac{e^2(t)}{T^3} \cdot 1650 \cdot (f_1(T_c)) \right] + f_2(k_2, k_3, T), \end{aligned} \quad (8)$$

burada:

$$f_1(T_c) = 1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3,$$

$$f_2(k_2, k_3, T) = \frac{k_2}{T} + \frac{k_3}{T^2}.$$

Beləliklə, cəm refraktivlik aşağıdakı iki həddli kimi təmsil oluna bilər

$$N = \alpha_1 F_1[e(t)] + \alpha_2 F_2[e(t)], \quad (9)$$

burada:

$$F_1[e(t)] = P(t) - e(t);$$

$$F_2[e(t)] = e(t) + \frac{e^2(t)}{T^3} \cdot 1650 \cdot f_1(T_c);$$

$$\alpha_1 = \frac{k_1 \cdot Z_d^{-1}}{k};$$

$$\alpha_2 = f_2(k_2, k_3, T).$$

Baxılması üçün cəm refraktivliyin aşağıdakı normalaşmış qiymətini nəzərdən keçirək:

$$N_{nor} = \frac{\alpha_1 F_1[e(t)] + \alpha_2 F_2[e(t)]}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (10)$$

Nisbi əmsalları daxil edək:

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad \beta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Çox güman ki, $\beta_1 + \beta_2 = 1$.

Beləliklə, cəm refraktivliyin normalaşmış qiyməti bu cür təyin oluna bilər:

$$N_{nor} = \beta_1 F_1[e(t)] + \beta_2 F_2[e(t)] \quad (11)$$

$P(t) = const$ şərti altında su buxarlarının parsial təzyiqinin azalması (11)-ci modeldə aşağıdakı dəyişikliklərə gətirəcək:

1. $F_2[e(t)]$ qiymətinin azalmasına;
2. $F_1[e(t)]$ qiymətinin artmasına.

$e(t)$ qiyməti artsa, onda əks prosesin baş verməsini gözləmək olar.

Yuxarıda qeyd etdiklərimizi nəzərə alsaq, onda demək olar ki, N_{nor} cəm refraktivliyin normalaşmış qiymətinin dəyişməsi xarakterinin proqnozunun mümkünlüyü xüsusi maraq doğurur.

Bu suala cavab vermək üçün iş [2]-də göstərilmiş çoxmeyarlı optimizasiyaya dair tədqiqat nəticələrindən istifadə etmək məqsədə uyğun olardı.

Bu işdə göstərilir ki, əgər sistem müəyyən $\varphi(t)$ funksiyasından qarşılıqlı inversiv formada asılılıqda olan iki F_1 və F_2 keyfiyyət funksionallarla xarakterizə olunarsa, yəni F_1 $\varphi(t)$ -nin artan, F_2 isə azalan funksiyası olarsa, onda xətti kombinədilmiş funksional bu cür olacaq:

$$L = \gamma_1 \cdot F_1[\varphi(t)] + \gamma_2 \cdot F_2[\varphi(t)]$$

və $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ olduqda, müəyyən $\varphi_o(t)$ nöqtəsində öz minimumuna çatacaq.

N_{nor} qiymətini minimuma endirən $e(t)$ qiymətini tapmaq üçün (10)-cu ifadənin surətini ekstremuma tədqiq etmək kifayətdir.

(10)-cu ifadə surətinin birinci törəməsini alıb, onu sıfır bərabər etsək:

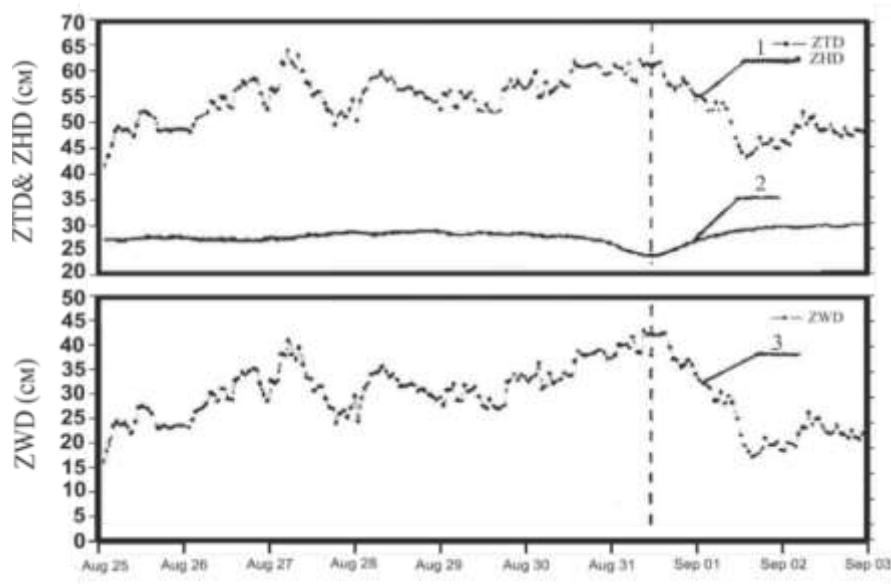
$$-\alpha_1 + \alpha_2 \left[1 + \frac{2e(t)}{T_3} \cdot 1650 \cdot f_1(T_2) \right] = 0, \quad (12)$$

(12)-ci ifadədən bunu alarıq

$$e(t) = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 \right) \frac{T_3}{2 \cdot 1650 \cdot f_1(T_c)}. \quad (13)$$

Beləliklə, cəm refraktivliyinin yuxarıda modelinə əsasən, (13)-cü ifadə ilə təyin olunan $e(t)$ qiymətində, ZWD azalan, quru gecikmə isə artan zaman intervalında cəm gecikmənin minimumu müşahidə olunmalıdır.

Misal kimi, DAEJ stansiyasında müşahidə olunmuş eksperimental gecikmə nəticələrini nəzərə çatdırırıq (şəkil). Göstərilmiş qrafiklərdən görünür ki, 01.09 - 02.09 zaman intervalında ZWD, ZHD-nin əksfazalı dəyişmələri müşahidə olunur və nəticədə cəm gecikmə minimal qiymətdən keçir [6].



Şəkil – Kanadanın DAEJ stansiyasında 25.08.2002-03.09.2002 tarixində cəm gecikmənin (əyri 1), hidrostatik gecikmənin (2) və rütubət gecikməsinin (3) zamanla dəyişməsinin qrafikləri [6]

Figure – Graphs of change of total delay (curve 1), hydrostatic delay (2) and humidity delay (3) on time in Canadian DAEJ station on 25.08.2002 – 03.09.2002 [6]

Beləliklə, cəm refraktivliyinin təklif etdiyimiz modeli, onun ayrı-ayrı tərkiblərinin zaman dəyişmələrinin öyrənilməsi əsasında, cəm refraktivliyinin zaman dəyişməsinin proqnozunu deməyə imkan verir. Aydındır ki, zaman məsələsinin əks qoyuluşu da müm-

kündür, yəni cəm troposfer refraktivliyinin və su buxarları refraktivliyinin öyrənilməsi əsasında hidrostatik troposfer refraktivliyinin zamanla dəyişməsinin xarakterini də öncədən demək olar.

Nəticə

Aparılmış tədqiqatların yekununda aşağıdakı əsas nəticələr alınmışdır:

- Troposfer refraktivliyinin normalaşmış riyazi modeli təklif edilmişdir.
- Su buxarlarının parzial təzyiqinin hesablanması üçün cəm gecikməni minimal qiymətə çatdırıran analitik ifadə alınmışdır.

- Əldə edilmiş faktiki material və təklif olunmuş model əsasında proqnozu verilmiş cəm troposfer gecikməsinin minimuma çatdırılması mümkünluğunun eksperimental təsdiqi aşkar olunmuşdur.

REFERENCES

1. Ahn Y.W., Kim D., Dare P. Positioning impact from imbalanced atmospheric GPS network errors. ION GNSS 20th International Meeting of the Satellite division, 25-28 September 2007, Fort Worth, TX, pp. 2302-2312 (*in English*)
2. Oblaka. Aviaciya specialnogo naznacheniya. 2012. Available at: <http://aviaspec.com/aviatsionnaya-meteorologiya/oblaka.html>. (*in Russian*)
3. Training manual for GPS operations, Nd dept of transportation surveys & photogrammetry, 2007, January, pp. 1-54. Available at: www.dot.nd.gov/manuals/design/surveymanual (*in English*)
4. Eminov R.Ə., İbrahimova S.İ. Yağışın GPS mövqetəyinə sistemlərinin keyfiyyətinə etdiyi təsirinin kompleks qiymətləndirilməsi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, Bakı, 2020, cild 12, №1, s. 92-96. (*in Azerbaijani*)
5. Eminov R.A., Ismailov K.H., Javadov N.G., Gafarov N.G. Voprosy ocenki vliyaniya dozhdaya na troposfernuyu zaderzhku signalov GPS navigacionnyh sistem. X Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Agrarnaya Nauka – selskomu hozyajstvu", sbornik statej, kniga 2. Barnaul, 2015, s. 381-382 (*in Russian*)
6. Asadov H.G., Suleymanov Sh.T. Sintez trekhvolnovyh skorrektsirovannyh izmeritelej malyh komponent atmosfery v ultrafioletovom diapazone. Moskva: *Metrologiya*, 2007. № 9, s. 3-7 (*in Russian*)

Computer Simulation of a Convertor-Type UAV Planer Based on Applied Applications

A.A. Abdullayev

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

For correspondence:

Abdullayev Anar / e-mail: anarcafarov09@mail.ru

Abstract

The paper shows how important it is when designing to take into account the features of the wing aerodynamics and solving the issues of regulating the stability of the aircraft. Further development of unmanned aviation to ensure long-term flight of unmanned aerial vehicles directly depends on the ratio of power and weight, power and overall dimensions of control systems (propulsion systems), aerodynamic features of the wing, as well as aerodynamic quality factors of the wing of the aircraft. The energy consumed during flight by an aircraft directly depends on the chosen wing shape. At the same time, in order to save the energy of the aircraft during flight, in order to quantitatively exceed the coefficient of lift created by the angle of attack of the wing from the coefficient of resistance, during the design period of the aircraft it is necessary to use mainly this wing design.

Keywords: unmanned aerial vehicles, tilt-rotor, glider, flying wing, aerodynamic features.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_ 95_105

Received 12.10.2021
Revised 16.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Abdullayev A.A.
[Computer simulation of a convertor-type UAV planer based on applied applications]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 95-105 (in Azerbaijani)

Tətbiqi proqramlar əsasında konvertoplan tipli pilotsuz uçuş aparatının planerinin kompüter modelləşdirilməsi

A.A. Abdullayev

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

Yazışma üçün:

Abdullayev Anar / e-mail: anarcafarov09@mail.ru

Xülasə

Məqalədə, uçuş aparatının layihələndirilməsi zamanı qanadların aerodinamik xüsusiyyətlərinin nəzərə alınmasının və dayanıqlığın tənzimlənməsi məsələlərinin həll olunmasının vacibliyi qeyd olunur. Həmçinin, uçuş zamanı sərf olunan enerji uçuş aparatı üçün seçilmiş qanadın formasından və həmlə bucağından asılı olaraq qanadın yaratdığı qaldırıcı qüvvə əmsalının qarşı müqavimət qüvvəsi əmsalından neçə dəfə böyük olmasını göstərən kəmiyyətdən birbaşa asılı olur və layihələndirmə zamanı uçuş aparatının uçuş vaxtı enerjiyə qənaət etmək imkanına sahib konstruksiyadan istifadə etmək tələb edilir.

Açar sözlər: pilotsuz uçuş aparatı, konvertoplan, planer, uçan qanad, aerodinamik xüsusiyyətlər.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_95_105

УДК: 623.746.4-519

Компьютерное моделирование планера БПЛА конвертопланерного типа на основе применяемых прикладных программ

А.А. Абдуллаев

Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Для переписки:

Абдуллаев Анар / e-mail: anarcafarov09@mail.ru

Аннотация

В статье отмечено, как важно при проектировании учитывать особенности аэродинамики крыла и решения вопросов регулирования устойчивости летательного аппарата. Энергия, потребляемая во время полета летательным аппаратом, напрямую зависит от выбранной формы крыла. При этом в целях экономии энергии летательного аппарата при выполнении полета для количественного превышения коэффициента подъемной силы, создаваемой углом атаки крыла от коэффициента сопротивления, в период проектирования летательного аппарата требуется использовать преимущественно данную конструкцию крыла.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, конвертопланы, планер, летающее крыло, аэродиномические особенности.

Giriş

Pilotsuz uçuş aparatlarının uzun müddətli uçuşunun təmin edilməsi – uçuş aparatlarının inkişafı, planerin enerji və çəki, güc və hərəkətverici sistemlərinin qabarit ölçülərinə nisbətindən, qanadın aerodinamik xüsusiyyətlərindən, həmçinin uçuş aparatının qanadının aerodinamik keyfiyyət əmsalından birbaşa asılı olur.

İşin məqsədi

Sabit "uçan qanad" formalı planer konstruksiyasına sahib konvertoplan tipli PUA-nın "SolidWorks", "ANSYS", "Profil" və "Xflir5" tətbiqi proqramlar əsasında kompüter modelləşdirilməsi.

PUA-nın uçuşunun avtonomluq şərtinin ödənməsi ən vacib və mürəkkəb həllərdən bəri dir. Bu səbəbdən hazırlanan PUA-lara qoyulan əsas tələb sərbəst uçuşun təmin edilməsi şərtinin ödənilməsidir. Artıq tam və yaxud qismən avtonom PUA-lar hazırlanmışdır. Əsas avtonomluq UA-nın uçuşu idarəetmə prosessoru, inersial naviqasiya, təzyiq və s. duygacların verilənləri ilə təmin edilir. Tam avtonomluq şərtinin ödənilməsi halında UA-nın istənilən situasiyaya adekvat cavab vermək və təyyarənin xarici təsirlərə (məhdudiyyətlərə) qarşı dəyişliqliq xüsusiyyətləri göstərməsi ilə xarakterizə olunmasıdır [1, 2].

Konvertoplanerdə dartı və qaldırıcı mühərriklər UA-nın manevr imkanlarını artırır. Mühərriklərin vəziyyəti (şaquli, üfüqi) və işləmə ardıcılığından asılı olaraq həm qaldırma qüvvəsi, həm də dartı qüvvəsi yaranır. UA-nın qalxması qaldırıcı mühərriklər (fırlanma müstəvisinə paralel), üfüqi uçuşu isə (fırlanma müstəvisi perpendikulyar) dartı mühərriki hesabına yaranır. Nəticədə UA təyyarə rejimində uçuşu davam etdirir. Əks proses zamanı isə UA şaquli uçuş (multikopter) rejiminə keçir.

Qaldırıcı mühərrik pərlərinin qarşılıqlı əks istiqamətlərdə fırıldanma momentlərinin diferensial fərqlənməsi nəticəsində qalxma, dartı mühərriklərinin yaratdığı dartı qüvvəsi nəticəsində irəliləmə və UA-nın eleronlarının hücum bucaqlarını dəyişməsi nəticəsində istiqamətlənmə hərəkəti yaranır. Konvertoplan təyyarə rejimində üfüqi uçuş zamanı helikopter və çoxrotorlu UA-ların məhdudiyyətlərindən (az uçuş məsafəsi və aşağı uçuş sürəti) azad olur.

"*Uçan qanad*" sabit qanad konfiqurasiyalı UA-ya aid olub, strukturuna qanad, füzelyaj və quyrug hissəsindən ibarət sadə forma daxildir. Füzelyajı olmayan "*uçan qanad*" tipli sabit qanadlı təyyarə modelləri də mövcuddur. Həmçinin "*uçan qanad*" konstruksiyasına tutacaqlar, asqlar, yük bölməsi, eləcə də şaquli və üfüqi stabilizator qismində kiçik konstruktiv birləşmələr də daxil ola bilir [3].

"*Uçan qanad*"-in aerodinamik xüsusiyyətləri

UA-da qaldırma qüvvəsini aerodinamik səth yaradır və qaldırma qüvvəsi ilə paralel olaraq, ona müəyyən qədər əks olan mənfi qarşı müqavimət və sürtünmə qüvvələri yaranır. Həmçinin üfüqi, şaquli stabilizator, füzelyaj və s. uçuş zamanı müəyyən əks müqavimət qüvvələri formalaşdırır. Yaranan bu əks qüvvələrin qiyməti "*uçan qanad*" formasında aşağı olur. Az da olsa, yaranan qaldırma qüvvəsi hesabına UA-nın uçması təmin olunur. "*Uçan qanad*" konstruksiyasında qanadın yaratdığı qaldırma qüvvəsinə nisbətən daha az əlavə müqavimət yaranır və bütün konstruksiya qaldırma qüvvəsi yaratmaq imkanına malik olur. Bu xüsusiyyət adı qanad konfiqurasiyaları ilə müqayisədə "*uçan qanad*"-in səmərəliliyini yüksəldir [4]. Ümumiyyətlə, "*uçan qanad*" konstruksiyasının aşağı əks müqavimət qüvvəsi, yüksək aerodinamik qaldırma əmsali,

aşağı aşkarlanma ehtimalına sahib olması, uçuşun məxfiliyinin təmin olunması və s. kimi müsbət xüsusiyyətlər ilə xarakterizə olunur.

“Uçan qanad” formasının hava axınında aerodinamik spektrinin asimetrik olması səbəbindən (axında ən yüksək deformasiya qanadın ən böyük səth əyriliyinə malik olduğu yerdə müşahidə olunur) həmin nöqtədə hava axını daha çox sıxılır və əksinə aşağı, daha az əyriliyi olan səthdə damlaşəkilli formanın aerodinamik spektri isə (cismin simmetriya oxu axının hərəkət istiqaməti ilə uyğun olduqda) simmetrik və rəvan olacaqdır.

Konstruksiyasında sabitləşdirici və idarəetmə səthlərinin sadə olmaması səbəbindən onun forması qeyri-simmetrik hesab olunur və idarəedilməsi mürəkkəb sayılır. Qeyd olunan bu xüsusiyyətlərin aradan qaldırılmasına çalışıqlıda yüksək aerodinamik keyfiyyət əmsali, aşağı çəki və kiçik aerodinamik müqavimət qiyməti kimi müsbət xüsusiyyətlərin azalmasına səbəb ola bilər.

Adı UA-larda aktiv və passiv dayanıqlıq istiqamətləndirici sükan və şaquli hava stabilizatoru vasitəsilə əldə olunur. “Uçan qanad” formasına bu konstruksiyanı tətbiq etmək mümkün deyildir. Bəzi “uçan qanad”da qanad sonluğu olmur və UA müəyyən bir tərəfə menyilləndikdə böyük qanad məsafəsi hesabına qanadda daha yüksək müqavimət qüvvəsi yaranır [5]. Nəticədə tələb olunan tarazlaşdırıcı qüvvə formallaşır.

Aktiv dayanıqlığa qanad uclarının yaxınlığında yerləşən müəyyən formalı əyləc (eleronlar) vasitəsilə əlavə müqavimət qüvvəsi yaratmaqla nail olunur. Planerə müxtəlif konstruksiyalar, belə ki, ayrı-ayrı hava əyləc sistemi və eleronlar, həmçinin diferensial dərti qüvvəsi yaranan sistemlər tətbiq edilə bilər. “Uçan qanad”ın üfüqi uçuşu zamanı passiv dayanıqlığa nail olmaq üçün sağ və sol qanad sonları maili

bucaq şəklində yuxariya burulmuş şəkildə hazırlanır.

Bu səbəbdən, X oxu üzrə üfüqi uçuş zamanı UA-nın idarə edilməsi qanad sonlarında yaranan diferensial turbolentliyin minimuma endiririlməsi hesabına daha asan əldə edilir. Qanad sonluğununa yaxın yerləşən eleronlar təyyarənin aktiv dayanıqlığının təmin edilməsinə kömək edir. Eleronlar diferensial qalxma prosesini, bu da UA-nın uçuşunun idarə edilməsinə və ya pilotun kren sürətini tənzimləməyə imkan yaradır. Ənənəvi uçuş aparatlarının çoxunda üfüqi stabilizator var və o, Y oxu üzrə passiv dayanıqlığa nail olmağa kömək edir. Digər tərəfdən, aktiv dayanıqlıq bu stabilizatorda yerləşən qaldırıcı servo mühərrikli idarəetmə mexanizmlərin köməyi ilə (verilmiş istiqamətdə şaquli qüvvəni artırır və ya azaldır) əldə olunur. “Uçan qanad”da üfüqi stabilizator yoxdur.

Bu səbəbdən, əsas qanadın arxa hissəsi stabilizator rolunu oynayır və qanadın arxa hissəsi fərqli hazırlanır. Hükum bucağı böyük olduqda yaranan ümumi fırlanma momenti qüvvəsi hücum bucağını daim azaldır. Digər tərəfdən, aktiv dayanıqlıq qanadın arxa hissəsində yerləşən nəzarət səthləri və eleronlar vasitəsilə əldə olunur.

Küy effektini azaltmaq üçün PUA-nın qaldırıcı və dərti qüvvəsini akkumulyator batareyası ilə qidalanan elektik mühərrikleri, həmçinin uzun müddətli uçuşu təmin etmək üçün dərti mühərrikini daxili yanma mühərrikini (DYM) ilə əvəz etməyin mümkünlüyü tədqiq olunmuşdur.

PUA-ya qoyulan iqtisadi və istehsal tələbləri UA uçuşu tam hazır olduqdan sonra qiymətləndiriləcəkdir. Sistem və qurğulara qoyulan əsas tələb PUA-nın avtonom uçuşunun və istismarının sadə olması şərtlərinin ödənməsidir [6-8].

Təhlil olunan konfiqurasiya variantları

Burada PUA-nın layihələndirilməsi zamanı müqayisə edilən eskiz layihələri təsvir edilmiş və təklif olunan müxtəlif konfiqurasiya variantlarının güclü və zəif tərəflərinin təhlilinin nəticələri verilmişdir.

Təklif olunan layihələrin qiymətləndirilməsi əsasında yekun konfiqurasiya seçilmişdir. Bu zaman şaquli qalxma və üfüqi uçuşun təmin edilməsi sisteminin üstünlük və çatışmazlıqları müqayisə edilmişdir.

Nəticədə, ikinci – üfüqi uçuşun təmin edilməsi üçün dərti mühərrikindən istifadə etmək variantı seçilmişdir. Bu variant üçün “*uçan qanad*” tipli planer – 4 ədəd qaldırıcı və 1 ədəd dərti qüvvəsini yaradan kollektorsuz elektrik mühərrikdən (DYM-dən), eləcə də pərlərdən ibarət sistemdir. Burada PUA-nın 4 elektrik mühərriki ilə şaquli qalxması, üfüqi uçuşun təmin olunması məqsədi ilə dərti qüvvəsini yaradan mühərrikin işə düşməsi və əksinə proses başa düşür.

İlkin baza ölçülər

Baza ölçülər kütlə nəzərə alınmaqla müəyyən edilmişdir. PUA-nın tam çəkisi elektrik mühərrikli birinci hal üçün <6 kq və ikinci hal üçün <16.5 kq hesablanmışdır. Çəkiyə daxil olan komponentlərin seçimi aparılmışdır. Müqayisə olunan hər bir UA konfiqurasiyası üçün eskiz layihəsi çəkilmiş (şək. 1) və seçilmiş konfiqurasiya üçün çəki hesabatı aparılmışdır.

Çəki göstəriciləri PUA-nın hazırlanması zamanı ilkin layihə olaraq nəzərə alınmış və növbəti mərhələlərdə bu göstəricilərin yenilənməsi mümkündür.

Layihələndirilən konvertoplanın ilkin olaraq hesablanmış və ehtimal olunan parametrləri ədəbiyyat [9]-da verilmişdir.



Şəkil 1 – “Uçan qanad” korpusunun CAD program təminatı bazasında hazırlanmış sxemi

Figure 1 – Schematic of the "Flying Wing" body based on CAD software

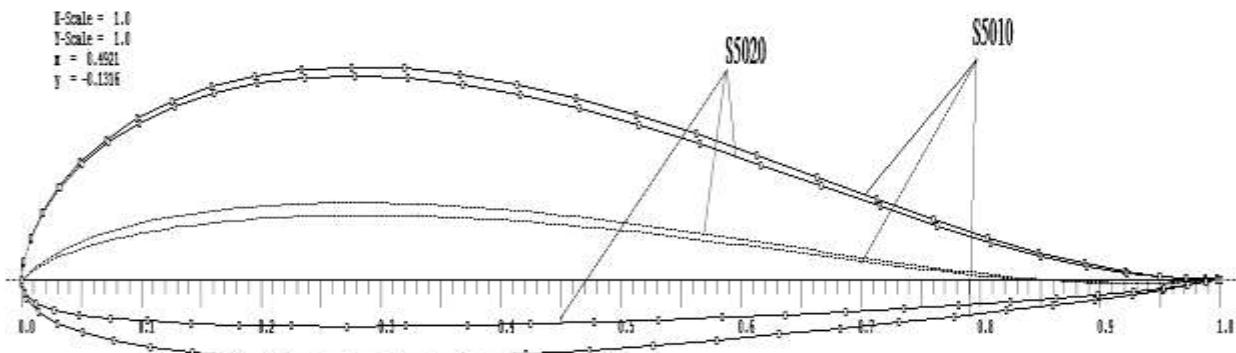
“*Uçan qanad*” tipli planerin layihələndirilməsi

“XFLR5” program təminatı bazasından istifadə etməklə təhlillər aparılmış və “*uçan qanad*” profilinin parametrləri hesablanmışdır. İlk önce, “*uçan qanad*” korpusunda istifadə ediləcək ən yaxşı aerodinamik profil seçmək üçün iki fərqli aerodinamik səthlərin CFD (*havanın dinamik axımı*) analizi aparılmış və tədqiq olunan qanad profillərindən biri seçilmişdir. Bunun üçün “XFLR5” programının alt sistemi olan “XFOIL” program bazasından istifadə edilmişdir.

Bazadan seçilmiş panel kodundan istifadə etməklə “*uçan qanadın*” aerodinamik səthlərinin aerodinamik xüsusiyyətləri qiymətləndirilmişdir.

Analiz üçün aerodinamik səthlərin qalınlıqları yüksək olan “S” seriyalı aerodinamik səthlər (S5010, $t/c=9.82\%$, S5020, $t/c=8.40\%$) seçilmiş və onlar üçün Reynolds ədədi geniş diapazonda hesablanmışdır (şək.2).

“XFLR5” bu qütbləri götürməklə və lazım olduqda fərqli Reynolds ədədlərindən istifadə etməklə hesablamalar arasında interpolasiya edərək VLM – vorteks qəfəs üsulu analizinə uyğun faiz nisbəti əlavə edilmişdir.



Nº	Name	Thickness (%)	at (%)	Comber (%)	at (%)	Points	TE Flap (°)	TEY Hinge	Show	Points	Centerline
1	S5010	9.82	7.60	2.20	27.60	62	0.00	0.00	✓	✓	✓
2	S5020	8.40	27.80	2.62	27.80	62	0.00	0.00	✓	✓	✓

Şəkil 2 – S5010 və S5020 aerodinamik səthlərin “XFLR5” program bazasında hesablanmış görünüşü
Figure 2 – Calculated view of S5010 and S5020 aerodynamic surfaces based on XFLR5 software

S5020 seriyalı aerodinamik səthin seçilmə səbəbi aşağıda qeyd edilmişdir:

- kiçik burulma əmsalına sahib olma ($c/4$);

- qanadın qaldırma qüvvə əmsalının maksimum yüksəlmə qiymətinin qanadın aerodinamik əmsalı göstəricisindən $s/4$ qədər aşağı olması. Qaldırma və sürtünmə əmsalları S5010, S5020 ardıcılılığı ilə artır.

Hücum bucağının ən yüksək qiyməti S5010 üçün təxminən 12-13 dərəcə olur. Lakin konvertoplan tipli PUA-nın qaldırma gücünü təmin etmək üçün daha yüksək qaldırma əmsalı tələb olunur [10].

Hücum bucağının ən yüksək qiyməti S5020-də təxminən 6-7 dərəcədə qeydə alınır. Planerin müəyyən hücum bucağı altında uçmasına imkan yaradır (şək. 3 a,b).

Təhlil edilmiş iki aerodinamik səthlər arasından təxminən 3,3 hücum bucağı altında S5020 sıfır yaxın olan ən aşağı C_m $\frac{1}{4}$ -ə əmsalına malik olur. Xordanın $\frac{1}{4}$ hissədə qüvvə momenti əmsalına görə aerodinamik səthlər üstünlük dərəcəsinə görə S5010 və S5020 ardıcılıqla sıralanır.

Konstruktiv olaraq qanad sonluğunun

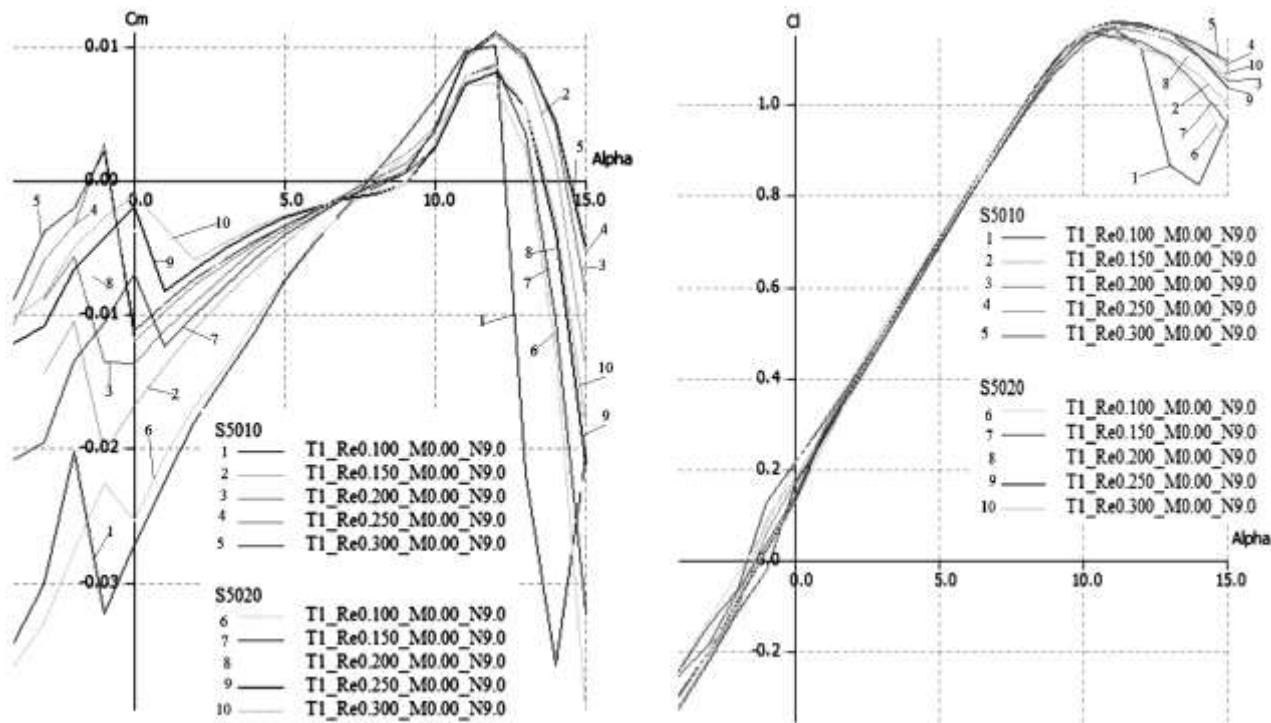
yığıılması və burularaq şaquli yuxarıya istiqamətlənməsi UA-nın və qanadın dayanıqlığını yüksəldir [11].

Aerodinamik səthin seçilməsindən asılı olaraq, $C_m=c/4$ -in aşağı qiymətlərində qüvvə momenti əmsalı sıfır yaxın olur. UA-nın qalınlığı ilə xordasının nisbətinin göstəricisi əsas parametr olub, tədqiqat zamanı onun nəzərə alınması vacib şərtidir.

Daha yüksək qalınlığa (t/c) malik və da-ha çox daxili həcm tələb edən nöqtədə yerləşdiriləcək aerodinamik səthli qanad “füzelyaj” adlanır. Bu səbəbdən, qalınlığa (t/c) və qanad sonluğununa görə üstünlük sırası $t/c = 9.82\%$ olan S5010 və $t/c = 8.40\%$ olan S5020 təşkil edəcəkdir.

UA-nın dinamik davranışını dayanıqlıq və nəzarət xüsusiyyətləri ilə müəyyən edilir ki, bu da öz növbəsində planerin aerodinamik xüsusiyyətləri ilə bağlıdır.

Planerin “uçan qanad” formada olduğunu nəzərə alsaq, qanadın düzgün aerodinamik dizaynda olması tələb olunan dayanıqlıq və nəzarət xüsusiyyətlərini təmin edəcəkdir.



Şəkil 3 – a) C_m aerodinamik səth və b) C_l əmsallarının hücüm bucağından asılılıq qrafikləri

Figure 3 – a) C_m aerodynamic surface and b) graphs of C_l coefficients depending on the angle of attack

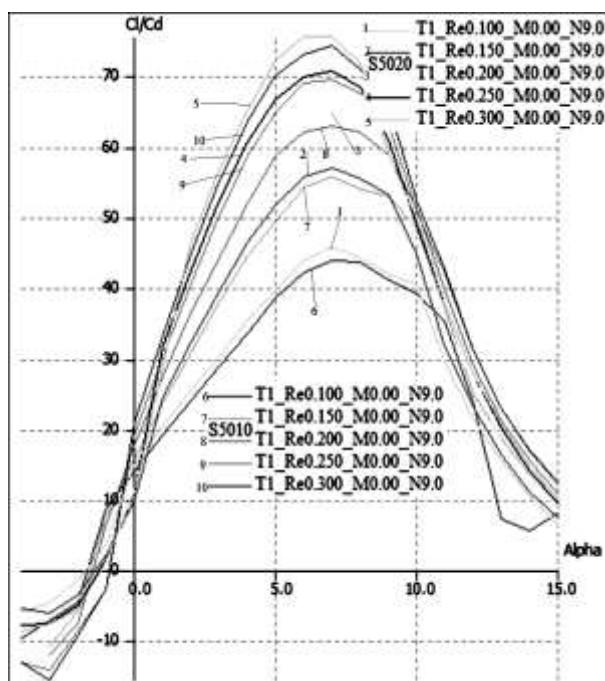
Uçuşun idarəetmə sistemləri aerodinamik tarazlığının pozulduğu hallarda dayanıqlığın təmin edilməsinə çalışırlar. *XFLR5* programı ilə qanadın sadə üç ölçülü modeli, iki üzlü və burulmuş forması hazırlanmış, eləcə də UA-nın aerodinamik xüsusiyyətləri və dayanıqlıq analizi aparılmışdır [12]. UA-nın uçuş texniki xüsusiyyətlərinin analizində ədədi metoddan istifadə edilir və burulğanlı axın və yaxud VLM metodunu özündə cəmləşdirən tapşırıqdan istifadə etməklə *XFLR5* programı tətbiq edilir. VLM analizi qaldırıcı cisimlərin havada mütləq axınınnı əks etdirir. Bu səbəbdən PUA-da keçərli olan aşağı Reynolds ədədləri üçün bu üsul real görünmür. *XFLR5* program təminatına əsasən aerodinamik qüvvələrə göstərilən əks təsirlər yaranan qüvvə əmsallarından qeyri-xətti asılı olur. Aerodinamik profili analiz edərkən VLM analizi nəticəsində təyin olunan qüvvələri qiymətləndirmək və daha real riyazi model əldə etməkdən ötrü alınmış həllə-

rin *Xfoil* analizi aparıla bilər. Hazırlanmış modellə “müstəqillik hipotezi”ni nəzəri olaraq, tətbiq etmək mümkün deyil. Bu səbəbdən, *XFLR5* programı vasitəsi ilə əldə olunan nəticələrin və tətbiqi həllərin ilkin model olaraq yoxlanılması mütləq hesab olunur. Buna baxmayaraq, əldə olunan nəticələr, “uçan qanad” modellərini müqayisə etmək üçün kifayət edir. Qanadın analizini aparmaq üçün qanadda bir-dəfəlik nümunə analizi üsulundan istifadə olunur. UA-nın ağırlıq mərkəzinin yerləşmə yeri, qanadın qaldırma gücü, qüvvə momenti və sürtünmə əmsalı və s. müxtəlif aerodinamik xüsusiyyətləri müəyyən etmək üçün kütlə tərazlığı halı təmin olunur.

Bundan əlavə, yan və uzununa dayanıqlığı müəyyən etmək üçün dinamik dayanıqlıq hesabatları aparılır. Bu analiz üçün dörd fərqli qanad sonluğu tərtib etmişik (qanad sonluğu: 0° , 45° , 60° və 90° olan qanadlar). Qanad sonluğu qaldırma qüvvəsini təmin edir və bu za-

man daha yüksək qaldırma əmsalı tələb olunur. Müəyyən həcüm bucağı altında daha yüksək sürtünmə əmsalı UA-nın uzaq məsafəyə uçmasına təmin edəcəkdir.

Şək. 4-də təsvir olunan qrafikdən qaldırma əmsallarının yüksəldiyi aydın görünür və 6° - 12° həcüm bucağı altında qanad konfiqurasiyası 45° olan qanad üçün ən yüksək olur. 0° həcüm bucağı altında olan əmsaldan eyni qanad konfiqurasiyasında hamar səthdə mənfi qaldırma qüvvəsi olmasına baxmayaraq, uzununa dayanıqlıq mane olacağından, istifadəsi tövsiyə edilmir.



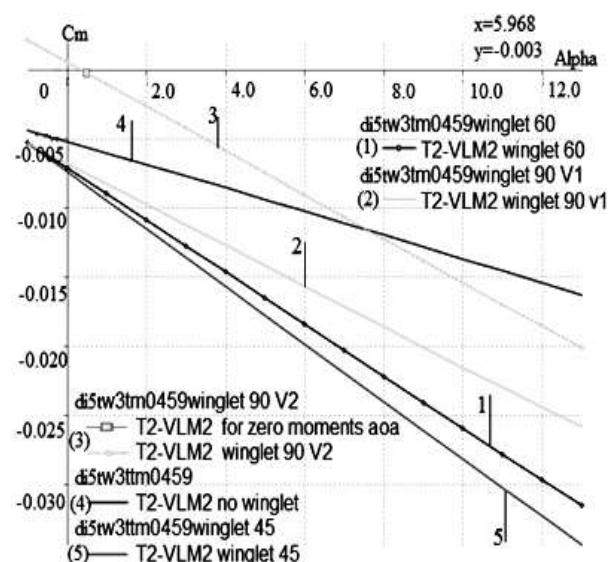
Şəkil 4 – C 1/Cd əmsalının həcüm bucağından asılılıq qrafiki

Figure 4 – Graph of dependence of the coefficient C_1/C_d on the angle of attack

Cm və alpha nisbətinə görə, ən yaxşı qanad konfiqurasiyası hər iki konfiqurasiyadan birinin 90° ilə olmalıdır (şək. 5).

Dinamik dayanıqlıq üçün qanad sonluğu olmadan qanadın həm uzununa, həm də yan istiqamətdə sabitliyini təmin etmək mümkün deyildir. Beləliklə, hazırlanmış UA-da şaquli stabi-

lizator rolunu oynayacaq qanad tətbiqi ortaya çıxmışdır. Bu, qanadın kren və istiqaməti dəyişmə momentlərinə təsir göstərərək sistemi tərazlıq vəziyyətinə keçirəcək.



Şəkil 5 – Qüvvə momentinin həcüm bucağından asılılıq qrafiki

Figure 5 – Graph of the dependence of the moment of force on the angle of attack

Qanad sonluğu olan konfiqurasiyalı "uçan qanad"-ın dinamik dayanıqlığı 0° - 900° səviyyəsinə qədər artır. İlkin olaraq 900° bucaq altında "uçan qanadın" korpusunu hazırlamaq üçün CAD program təminatından istifadə olunmuşdur. UA-nın ilkin maketi çəki, ölçü və aerodinamik xüsusiyyətlərdən istifadə etməklə qurulmuşdur ("XFLR5" programında sınaqdan keçirildiyi kimi). Artıq "virtual prototip" hazırlanır. Tam modelləşdirmək üçün "Solid Works" və "ANSYS" kompüter program təminatlarından istifadə etməklə müxtəlif hesablama sınaqları aparmaq və modeli daha da təkmilləşdirmək üçün yeni parametrlər əldə etmək mümkündür.

Bunun üçün UA-nın konstruktiv dizaynı "SolidWorks" program təminatının bazasında mükəmməl şəkildə çəkilmişdir.

ANSYS program təminatlarının tətbiqi ilə aerodinamik sınaqlar

Aerodinamik sınaqların aparılması üçün əsas tapşırıqlar aşağıdakılardır: “*uçan qanad*” profili üzərindəki axın sxemini müəyyən etmək; müqavimət və qaldırma qüvvələrinin qiymətlərini təyin etmək.

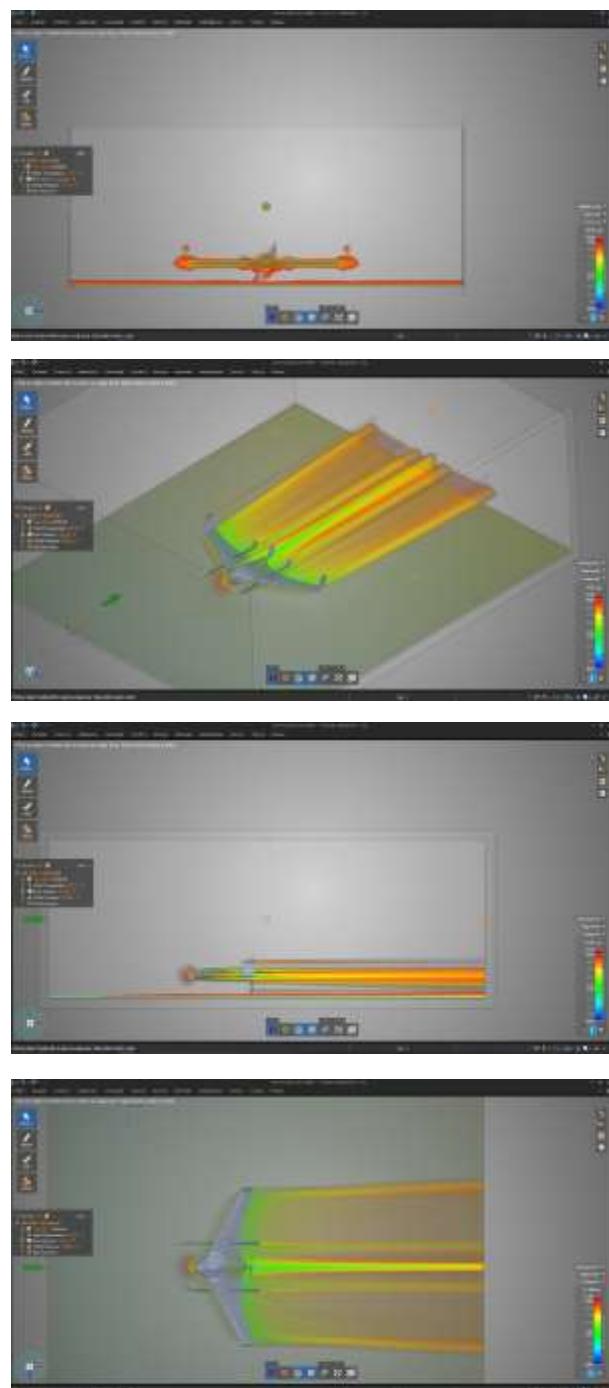
Aerodinamik layihələndirmənin yekun baza konfiqurasiyasına uyğun olmasını təmin etmək üçün “*Ansys-Fluent*” aerodinamik sınaqları aparılmışdır. Kompüter modelini hazırlanmaq üçün 8° hückum bucağı altında təyin edilmişdir. Bu, UA-nın z oxu ətrafında 8° bucaq altında həndəsi firladılması ilə mümkün olmuşdur. PUA-nın ətrafında uyğun aerodinamik və termal tor çəkilmişdir. Aşağıdakı parametrlərdən istifadə edilməklə, tor tamamlanmışdır.

Aerodinamik sınaqların nəticələri

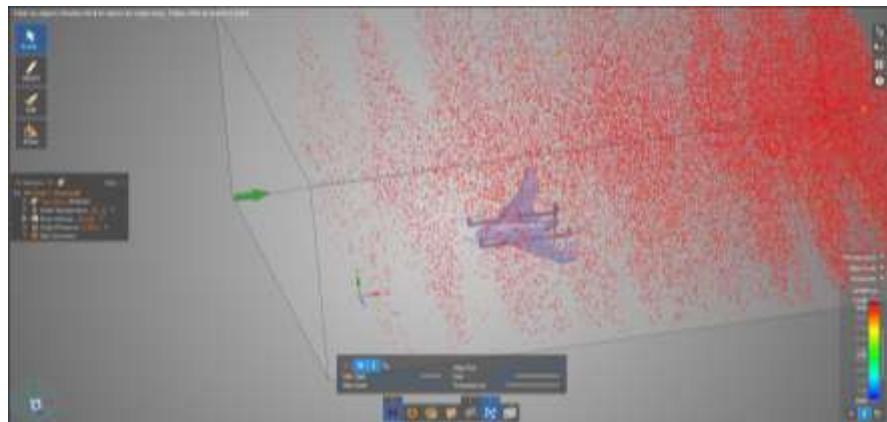
Analiz nəticəsində “*uçan qanad*” korpusu üzərindəki aşağı statik təzyiq yüksək sürətlə əlaqəlidir. Həmçinin statik təzyiqin qanadlar üzərində və korpusun arxasına doğru yüksəldiyi təyin edilmişdir. Yuxarı və aşağı səthlərdə təzyiq paylanmasıının nəticələri şək.6 a,b-də verilmişdir. Bu, yuxarı və aşağı səthlər arasındakı təzyiq fərqinin olduğunu açıq göstərir. Təzyiq paylama konturu göstərir ki, “*uçan qanad*”ın aşağısında yaranan təzyiq planerin yuxarı hissəsində yaranandan yüksəkdir. Əvəzləyici təzyiq fərqi Y oxu boyunca $+Y$ istiqamətində qüvvə meydana gətirəcəkdir.

Bu, konstruksiyanın qaldırma qüvvəsi yaradılmasına səbəb olacaqdır. UA-nın uzunu-na ox istiqamətində təzyiq paylanması “*uçan qanad*”ın ön hissəsindəki yüksək təzyiq sahəsini əks etdirir. Arxa tərəfdə nisbətən yüksək təzyiq sahəsi var və bunun üçün “*uçan qanad*”ın “*füzelyaj*” sahəsinin konstruksiyasını

təkrar layihələndirməyə ehtiyacın olmasını göstərir.



Şəkil 6 – a) Profildə uzununa ox boyunca və pər sahəsində təzyiqin və b) uzununa ox boyunca və pər sahəsində sürət paylanmasıın aerodinamik sınaqları
Figure 6 – a) Aerodynamic tests of pressure along the longitudinal axis and the area of the pen in the profile and b) the distribution of the image along the longitudinal axis and in the area of the pen



Şəkil 7 – a) Daxili ətraf axın kanalı üçün statik təzyiq və b) uzununa ox boyunca və pər sahəsində təzyiqin konturları
Figure 7 – a) Static pressure for internal peripheral flow channel and b) contours of pressure along the longitudinal axis and in the feather area

Uçuş zamanı “uçan qanad”ın pərlərinin sahəsi boyunca yaranan təzyiq paylanması aşağı dinamik təzyiq sahəsi formalaşdırır.

Şək. 7-də pər sahəsində və uçan qanadın “füzelyaj” sahəsindəki sürət profili əks etdirilmişdir. Pər sahəsindəki deşik sürətin demək olar ki, sıfıra bərabər olduğu iki sahədə sürətin azalmasına gətirib çıxarır. Bu isə o deməkdir ki, bu sahədə təzyiq artımı müşahidə olunur. Füzelyaj üzərindəki sürət profili üçün yuxarı səthin böyük bir hissəsində aşağı səthlə müqayisədə daha yüksək sürət olduğu görünür. Bu, qaldırıcı qüvvəni yaratmaq üçün kifayət edir.

XFLR5 program təminatı bazasında PUA-nın statik dayanıqlığı

Tənzimlənən xüsusiyyətlərə malik PUA-nın yaradılmasında tələbatın olduğunu nəzərə alsaq, hər üç ox boyunca statik dayanıqlıq xüsusiyyətlərini nəzərə almaq lazımdır. Bu, əsasən, PUA-nın tarazlama xüsusiyyətlərini müəyyənləşdirir. UA-nın yana və uzununa dayanıqlığa malik olub-olmadığını yoxlamaq üçün “XFLR5” program təminatından istifadə edilmişdir. Havanın xüsusiyyətləri sıxlıq üçün 1.027 kg/m^3 və kinematik özüllük üçün $1.685 \text{e-}05 \text{ m}^2/\text{san}$ təyin edilmişdir. Statik dayanıqlıq analizi üzrə edilən hesabatlardan ae-

rodinamik qüvvə momentlərinin təkcə təsiretmə bucağı funksiyası daşımadığı, həmçinin PUA-nın x , y , z oqları istiqamətində tanqaj, kren və istiqamət dəyişməsi üçün fərqli nəticələr əldə edildiyi qənaətinə gəlinmişdir. Hücum bucağından asılı olaraq qeyd olunan mailliyin qiymətinin mənfi olması səbəbindən tanqaj moment əmsalının uzununa statik dayanıqlığı $dC_m/d\alpha < 0$ şərtini ödəyir. Beləliklə, hər iki konstruksiya uzununa statik dayanıqlığa malikdir; hesablanmış 1-ci dərəcəli tənzimlənmiş hücum bucağı (α_e) = 0.68691° və hesablanmış 2-ci dərəcəli tənzimlənmiş hücum bucağı (α_e) = 0.34363° təşkil edir. 2-ci model 1-ci modellə müqayisədə daha uzununa statik dayanıqlığa malikdir, çünki qrafikdə də göstərildiyi kimi onun mailliyi 2-ci modelə nisbətən daha çoxdur. “Uçan qanad”的 korpusunun ağırlıq mərkəzləri müvafiq olaraq, 1-ci və 2-ci modeldən 0.30947 m və 0.44391 m məsafədə yerləşir. Yan statik dayanaqlıq şərtləri, qeyd olunan mailliyin, müvafiq olaraq, mənfi və müsbət olmasıdır, yəni $dC_l/d\phi < 0$ və $dC_n/d\beta > 0$. Beləliklə, bu iki qrafikdən aydın olur ki, PUA uzununa istiqamətli statik dayanıqlığa malikdir.

Nəticə

Sabit "uçan qanad" formalı konvertoplan tipli PUA-nın "SolidWorks", "ANSYS", "Profil" və "Xflir5" tətbiqi proqramları əsasında kompüter modelləşdirilməsi aparılmış və optimallaşdırılmış aerodinamik xarakteristikalar müəyyənləşdirilmişdir. Layihələndirilmə nəticəsində PUA-nın konstruksiyası, aerodinamik və dayanıqlıq xüsusiyyətləri müəyyən edilmiş, eləcə də əldə olunan hesabat və konstruktiv məlumatlara əsasən, baza qismində qanad açılışı 3.5 m olan PUA-nın seçilmiş kütlə elementləri və yekun konstruksiyası layihələnərək hazırlanmışdır. PUA-nın hərəkətverici hissələrinin ümumi çəkisi 6724 q təşkil edir. Bura

mühərriklər, pərlər, servoötürüçülər, servoötürücünün korpusu, dişli çarxlar, ESC və akkumulyator batareyası və bərkidici ləvazimatlar daxildir. Layihələndirmə zamanı seçilmiş servoötürüçülər bir saniyədən az müddətdə tələb olunan reaksiya müddətini almaq üçün kifayət qədər fırıldanma momentini təmin edir. PUA-nın hazırlanması üçün lazımlı olan, yerdə qalan digər inersial naviqasiya, rəbitə, idarəetmə mikrokontrolleri və digər birləşdirici ləvhələrdən ibarət avionika sistemi 3500 q. çəkiyə malikdir; Faydalı yükün maksimal kütləsi 2410 q alınır; PUA-nın maksimal uçuş çəkisi 16900 q-a bərabər olur.

REFERENCES

1. Nəbiyev R.N., Abdullayev A.A. və b. Litium əsaslı akkumulyator batareyalarının inkişaf mərhələləri. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*. Cild 11. №4, 2019, s. 70-81 (*in Azerbaijani*)
2. Csidenko V.V., Sviredenko YU.N. Ocenna letno-texnicheskie xarakteristiki letno-technicheskikh xarakteristik perespektivnoego vzloota i posadki. *Nauchnye vestnik MQTU QA*, 2008 q. № 125 seriya. Aeromexanika i prognost, s. 145-150 (*in Russian*)
3. Nebiyev R.N., Abdullayev A.A. Malorazmernye BPLA i sredstva borbi s nimi. Tom 9. №2, 2017, s. 15-20 (*in Russian*)
4. Hassanalian M., Rice D., Abdelkefi A. Evolution of space drones for planetary exploration: A review. *Progress in Aerospace Sciences* 97 (2018), 61–105 p. (*in English*)
5. Nebiyev R.N., Abdullayev A.A. Sravnitelnoy osobennostey akkumulyatornix batarey na osnove litiya. *Aviakosmiceskoe priborostroenie*. Moskva, 2019. № 9, s 29-41 (*in Russian*)
6. Karim N.M., Ahmed M.Y., et.al. "Long endurance hybrid fuel cell-battery powered UAV". *World Journal of Modelling and Simulation*, ISSN 1 746-7233, England, UK. Vol. 11 (2015) No. 1, pp. 69-80 (*in English*)
7. Nebiyev R.N., Abdullayev A.A. i.td. Analiz osobennostey vodoroda v kacestve istocnika enerqii. *Aviakosmiceskoe priborostroenie*. Moskva, 2021. № 3. s 41-58 (*in Russian*)
8. Abdullayev A.A. Tendenci razvitiya convertiplanovoqo tipa. *Tendenci razvitiya nauki i obrazovaniya*, *Nauchnyj jurnal*, №63/07/ 2020, Cast 1, Samara, s. 84-90 (*in Russian*).
9. Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullayev A.A. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane. *IOP Conference Series: Conference Scopus. Materials Science and Engineering*. 862 (2020) 022043, doi:10.1088/1757-899X/862/2/ 022043. (*in English*)
10. Nabiev R.N., Abdullaev A.A. i dr. Trebovaniya k BpLA na multirotacionnoy osnove. *Aviakosmiceskoe priborostroenie*. Moskva, 2018. № 9, s 3-11 (*in Russian*)
11. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A., Qaraev Q.İ. Razrabotka konceptualnoy funkcionalnoy sxemi bespilotnoqo konvertoplan s qibridnim istocnikom enerqi. *Aviakosmiceskoe priborostroenie*. Moskva, 2021. № 5, s. 1-16 (*in Russian*)
12. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A. Creation of convertible-type UAV. *4th International New York conference on evolving trends in interdisciplinary research & practices*. 2-4. 05. 2021, Manhattan, New York. Pp. 504-513 (*in English*)

Application of Machine Learning Methods for Classification of Agricultural Crops

A.N. Badalova, S.H. Guliyeva

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

For correspondence:

Guliyeva Sona / e-mail: guliyeva.s.h@gmail.com

Abstract

The article demonstrates the significant role of the impact of training samples on the processing of satellite images for the accurate classification of crops. To achieve the goal of the study, three machine learning methods are tested by classifying various satellite data with high spatial resolution. As a result of the application of machine learning methods, the results are compared and a method with a high classification accuracy is selected. Based on the obtained data, crop maps have been developed and an assessment of the vegetation state for the research period is carried out.

Keywords: satellite image, training sample, machine learning, classification, assessment, agricultural crop.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_106_116

Revised 10.01.2022
Accepted 17.06.2022
Received 22.06.2022

For citation:

Badalova A.N., Guliyeva S.H.

[Application of machine learning methods for classification and assessment of agricultural crops]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 106-116 (in Russian)

Kənd təsərrüfatı bitkilərinin təsnifatlandırılması və qiymətləndirilməsi üçün maşın öyrənmə üsullarının tətbiqi A.N. Bədəlova, S.H. Quliyeva

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

Yazışma üçün:

Quliyeva Sona / e-mail: guliyeva.s.h@gmail.com

Xülasə

Məqalədə kənd təsərrüfatı bitkilərinin dəqiq təsnifatlandırılması üçün peyk təsvirlərinin emalına təlim nümunələrinin təsirinin mühüm rolu nümayiş etdirilmişdir. Tədqiqat məqsədinə nail olmaq üçün yüksək məkan ayırdetməli müxtəlif peyk məlumatlarının təsnifatlandırılmasında üç maşın öyrənmə metodu sıraqlanmışdır. Maşın öyrənmə üsullarının tətbiqi nəticəsində alınan məlumatlar müqayisə edilmiş və yüksək təsnifat dəqiqliyinə malik metod qeyd olunmuşdur. Alınan nəticələr əsasında kənd təsərrüfatı bitkilərinin növlərinin xəritələri hazırlanmış və tədqiq olunan dövr üçün vegetasiya vəziyyətinin qiymətləndirilməsi aparılmışdır.

Açar sözlər: peyk təsviri, təlim nümunəsi, maşın öyrənmə, təsnifatlandırma, qiymətləndirmə, kənd təsərrüfatı.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_106_116

УДК: 528.8

Применение методов машинного обучения для классификации сельскохозяйственных культур А.Н. Бадалова, С.Г. Кулиева

Azerbaydzhanskaya Natsional'naya akademiya aviacii (Marvakyanский пр. 30, Baku, AZ1045, Azerbaydzhan)

Для переписки:

Кулиева Сона / e-mail: guliyeva.s.h@gmail.com

Аннотация

В статье подчеркивается роль влияния обучаемых выборок на обработку спутниковых изображений для точной классификации сельскохозяйственных культур. Для достижения цели исследования было апробировано три метода машинного обучения при классификации различных спутниковых данных с высоким пространственным разрешением. В результате применения методов машинного обучения проведено сравнение результатов и выбран метод с высокой точностью классификации. По полученным данным разработаны карты типов сельскохозяйственных культур и проведена оценка вегетационного состояния за исследуемый период времени.

Ключевые слова: спутниковое изображение, обучаемая выборка, машинное обучение, классификация, оценка, сельскохозяйственная культура.

Введение

Как и в других сферах человеческой деятельности, в сельском хозяйстве ведется постоянный поиск новых технологий, которые позволяют улучшить процесс производства продукции и рационального использования природных ресурсов. Развитие компьютерной индустрии, появление на рынке точной сельскохозяйственной техники с приемниками глобальной системы позиционирования (GPS), всевозможными датчиками и бортовыми компьютерами с соответствующим программным обеспечением, а также возможностью использования географической информационной системы (ГИС) для обработки и визуализации пространственно-атрибутивных данных привели к появлению новой концепции, называемой *точным земледелием* [1].

Для решения задач мониторинга сельскохозяйственных полей большое значение имеет выбор оптимального метода классификации спутниковых снимков и идентификации сельхозкультур. За последние десятилетия были разработаны различные методы для контролируемой и неконтролируемой классификации спутниковых изображений [2].

Обучающие выборки являются одним из важных элементов контролируемой классификации, поскольку в зависимости от характеристик данных обучения и их адаптации с алгоритмом обучения они могут повлиять на ожидаемые результаты как отрицательно, так и положительно [3].

Основной целью исследования является определение влияния обучаемых выборок на классификацию спутниковых изображений высокого разрешения для идентификации типов сельскохозяйственных культур.

Постановка задачи

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи: применение методов машинного обучения для классификации спутниковых изображений; изучение влияния объема данных на точность классификации с использованием разного количества классов и обучающих выборок; сравнение результатов разных снимков высокого разрешения в одинаковых условиях; определение точности классификаций спутниковых изображений; оценка состояния сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода.

Решение задачи

В исследовании были использованы спутниковые изображения Azersky и PlanetScope, карта посевов и земельного покрова, наземные данные и веб-карты. Территория исследования, занимающая площадь 119 км², представлена на рис. 1. Село Гозлубулаг расположено в предгорной местности юго-восточной части Шекинского района. На исследуемой территории встречаются такие объекты, как реки, поселки, поля сельскохозяйственных культур, луга, леса, горы и т. д.



Рисунок 1 - Территория исследования (село Гозлубулаг, Шекинский район)

Figure 1 - Study area (Gozlubulag district, Sheki region)

Спутниковые изображения были получены со спутника Azersky по следующим датам: 2 мая, 22 мая, 3 июня и 23 июня 2019 года. Для сравнения результатов классификации с различных спутников были выбраны мультиспектральные изображения с пространственным разрешением 6 м и 3 м соответственно для Azersky и PlanetScope. Даты и время получения снимков соответствуют для Azersky 2 мая 2019 г., 07:21:49,5 и PlanetScope 2 мая 2019 г., 06:15:37 соответственно.

Панхроматические изображения Azersky с пространственным разрешением 1.5 м использовались в качестве вспомогательных только для визуального анализа, идентификации объектов и участков посевных площадей, расположенных на исследуемой территории.

Основные обучающие выборки для дальнейших процедур были извлечены из карты посевов и земельного покрова, представленной на рис. 2.

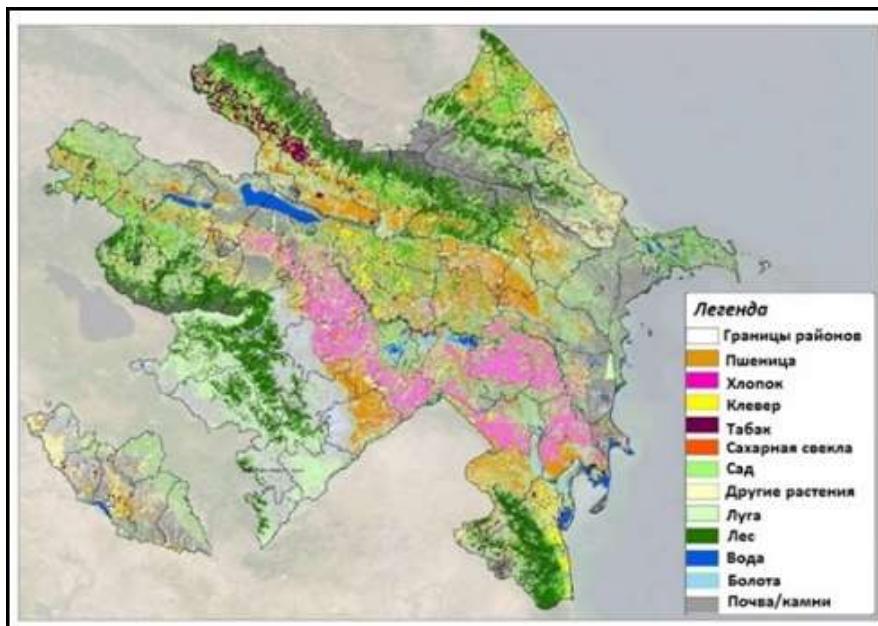


Рисунок 2 – Карта сельскохозяйственных культур и земного покрова Азербайджана (Азеркосмос, 2019)
Figure 2 – Crop and land cover map of Azerbaijan (Azercosmos, 2019)

На карте сельскохозяйственных культур и земного покрова имеется информация о различных категориях, таких как инфраструктура, пшеница, хлопок, табак и др.

Дополнительные обучающие выборки были созданы на основе веб-карт и наземных данных. Координаты полей с определенными типами культур были сняты с помощью прибора GPS E-Trex 10.

Методология исследования представляет собой эффективный метод классифи-

кации спутниковых снимков с полуобучением, не требующий наличия обучающих выборок для всех классов в связи с основной целью исследования.

Методология исследования включает в себя следующие 5 основных этапов:

1. получение и предварительная обработка изображений;
2. извлечение необходимых классов из карты сельскохозяйственных культур и земельного покрова;

3. создание обучающих выборок и классификация изображений;
4. оценка точности и сравнение результатов классификации различных спутниковых изображений;
5. верификация результатов и мониторинг тестовых сельскохозяйственных полей.

Классификация спутниковых изображений рассматривается как комплексный подход на основе применения трех методов классификации машинного обучения: максимальное правдоподобие (ML), машина опорных векторов (SVM) и случайный лес (RF).

Перед классификацией изображений была выполнена атмосферная коррекция, чтобы улучшить качество изображения и преобразовать значения изображений из излучения в отражение. Отражение, измеренное в верхней части атмосферы, чрезвычайно полезно, потому что это сопоставимое число с любого спутника в любом месте, которое не меняется в зависимости от времени суток или времени года, пока не изменится содержимое территории. При вычислении спектральных индексов в ГИС часто используется такие индексы, как NDVI или NDWI [4]. После этапа преобразования изображения были обрезаны по интересующим областям (AOI) и преобразованы в единую систему координат.

Классификация может быть определена из множества источников, начиная от фактических наземных исследований мест отбора проб, использования аэрофотосъемки или спутниковых изображений [5].

Карта сельскохозяйственных культур и земельного покрова для исследуемой территории была извлечена из карты для всей территории Азербайджана. Данная

карта была преобразована из растрового в векторный формат. Из 10 представленных классов 6 классов были исключены, а 4 класса, такие как пшеница, луга, лес и почва / камни, использовались для дальнейшего анализа. К 4 классам, полученным из карты, были также добавлены 2 класса: вода и ячмень. Класс воды был определен визуально и подтвержден Open Street Map – картой, которая показана в виде слоя карты ESRI на рис. 3.

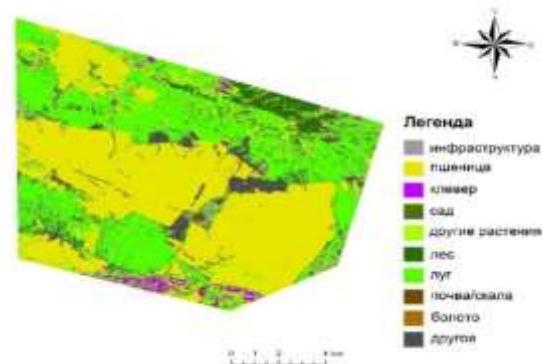


Рисунок 3 – Карта сельскохозяйственных культур и земельного покрова исследуемой территории
Figure 3 – Crop and land cover map of the study area

Обучающие выборки для сорта ячмень были получены на основании наземных данных, полученных с помощью GPS. Найденный класс воды имеет важное значение, так как для обеспечения урожайности сельскохозяйственных культур в период их вегетации имеется острый дефицит воды [6].

Применение обучающих выборок осуществлялось тремя разными способами.

В первом эксперименте обучающие выборки были сгенерированы случным образом на основе 6 классов без соблюдения фиксированного числа объектов. Для каждого класса было примерно создано следующее количество образцов, показанное в табл. 1.

Таблица 1 - Обучающие выборки для 1-го эксперимента

Table 1 - Training samples for the 1st experiment

Класс	Обучающие выборки
Пшеница	87
Ячмень	8
Луг	42
Почва, скала	20
Лес	15
Вода	21

Таблица 2 - Обучающие выборки для 2-го эксперимента

Table 2 - Training samples for the 2nd experiment

Класс	Обучающие выборки
Пшеница	50
Луг	30
Почва, скала	25
Лес	20
Ячмень	10
Вода	20

Таблица 3 - Обучающие выборки для 3-го эксперимента

Table 3 - Training samples for the 3rd experiment

Класс	Обучающие выборки
Пшеница	50
Луг	30
Почва, скала	25
Лес	20

Таблица 4 - Точность классификации изображений Azersky во время 1-го эксперимента

Table 4 - Overall accuracy of classified Azersky images during the 1st experiment

	2 мая %	22 мая %	3 июня %	23 июня %
ML	67	41	58	54
SVM	72	61	66	67
RF	75	66	68	68

Во втором эксперименте два класса были добавлены к классам, полученным из

карты и классам, по типам сельскохозяйственных культур и идентифицированным водным ресурсам (табл. 2).

В третьем эксперименте использовались обучающие выборки, полученные только из карты, и было создано определенное количество выборок для каждого класса (табл. 3).

Проведена классификация всех четырех изображений Azersky и оценена точность классификации (табл. 4).

Наилучший результат с высоким значением точности классификации был выбран из классифицированных изображений Azersky для сравнения этого результата с результатом со снимка PlanetScope.

Анализ для проведения различных экспериментов по реализации обучающих выборок проводился на основе изображения Azersky, полученного 2 мая 2019 года, по этой дате также было выбрано изображение, полученное со спутника PlanetScope. Точно такая же операция была произведена для изображения PlanetScope, полученного в тот же день, что и изображение Azersky. По результатам оценки точности классификации была составлена таблица 5.

Таблица 5 – Точность классификации изображений во время 1-го эксперимента

Table 5 – Overall accuracy of classified images during the 1st experiment

	Azersky, %	PlanetScope, %
ML	67	65
SVM	72	70
RF	75	72

По высокому значению точности была составлена карта (рис. 4).

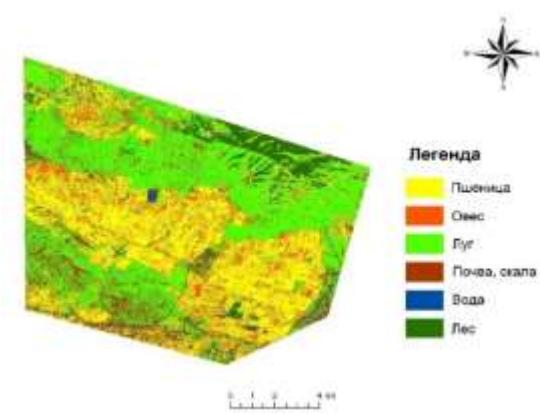


Рисунок 4 – Карта сельскохозяйственных культур и земного покрова, разработанная в ходе 1-го эксперимента

Figure 4 - Crop and land cover map developed during the 1st experiment

Оценка точности классификации изображений в ходе второго эксперимента показана в таблице 6. Высокий результат был получены с помощью метода RF и соответствуют 73% для изображения Azersky.

Таблица 6 – Точность классификации изображений во время 2-го эксперимента

Table 6 – Overall accuracy of classified images during the 2nd experiment

	Azersky,%	PlanetScope,%
ML	65	57
SVM	72	60
RF	73	65

В конце второго эксперимента был выбран также результат с высоким значением точности классификации и на основании их получена карта, представленная на рис. 5.

Для третьего эксперимента оценки точности классификации изображений приведены в таблице 7.

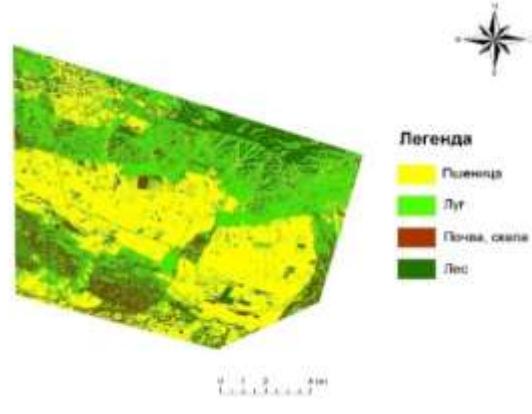


Рисунок 5 – Карта сельскохозяйственных культур и земного покрова, разработанная в ходе 2-го эксперимента

Figure 5 – Crop and land cover map developed during the 2nd experiment

Таблица 7 – Точность классификации изображений во время 3-го эксперимента

Table 7 – Overall accuracy of classified images during the 3rd experiment

	Azersky,%	PlanetScope,%
ML	84	77
SVM	83	76
RF	85	79

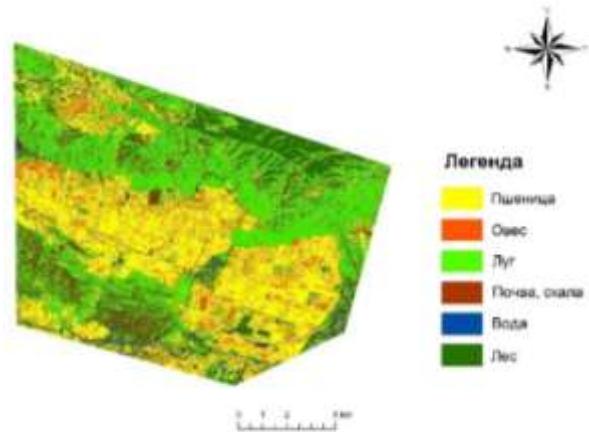


Рисунок 6 – Карта сельскохозяйственных культур и земного покрова, разработанная в ходе 3-го эксперимента.

Figure 6 – Crop and land cover map developed during the 3rd experiment

В третьем эксперименте наивысшая точность классификации изображений Azersky и PlanetScope, соответствующая

85% и 79%, была получена методом RF. В результате получена карта, соответствующая наивысшей точности по третьему эксперименту (рис. 6).

В ходе этого исследования было обнаружено, что при обучении изображений в случае применения наименьшего количества классов было получено высокое значение точности классификации.

Несмотря на то, что коэффициент каппа широко распространен и используется в качестве меры тематической точности в дистанционном зондировании, в данном исследовании как основной метод оценки точности классификации была использована общая точность, так как коэффициент каппа является неподходящим показателем для описания точности классификации. С другой стороны, общая точность, хотя и некорректна, но имеет четкое значение и по сравнению с каппа ее легче получить [7].

Таким образом, наиболее высокая оценка точности классифицированных изображений была обнаружена с помощью метода классификации случайного леса (RF). Разница между этими результатами для спутниковых изображений Azersky и PlanetScope во время первого эксперимента составила 3%, второго – 8% и 6% в третьем эксперименте.

Несмотря на то, что существует прямая связь, которая была установлена многими исследователями между высоким пространственным разрешением и высокой точностью классификации, результат этого исследования показывает немного более низкую точность для изображения PlanetScope, которое имеет вдвое большее пространственное разрешение, чем изображение Azersky.

Комбинированное использование методов классификации для мультиспектральных изображений и стандартных методов интерпретации является очевидным способом повышения надежности мониторинга и классификации сельскохозяйственных культур различных типов в соответствии с их вегетационными периодами.

Далее, для верификации полученных результатов классификации были рассчитаны индексы растительности, а также для помощи в классификации при разграничении растительности или других классов почвенного покрова, а также было исследовано состояние сельскохозяйственных полей на основе изображений Azersky.

Различия в характере реакции растительности в диапазонах спектра позволяют рассчитать индекс (NDVI) [8], который является одним из наиболее широко используемых индексов, в основном в исследованиях растительности, так как является показателем здоровья растения и рассчитывается по тому, как растение отражает и поглощает различные световые волны.

Вегетационный индекс был рассчитан для всех доступных изображений Azersky и на основании индексных изображений была проведена оценка состояния вегетации для исследуемой территории (рис. 7).

На этой карте А, В, С и D указывают даты снимков Azersky 2 мая, 22 мая, 3 июня и 23 июня 2019-го года соответственно.

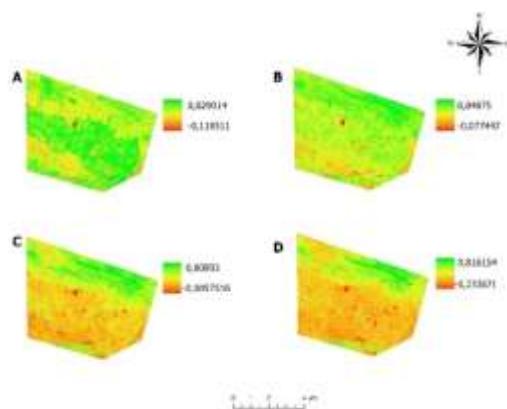


Рисунок 7 – Карты NDVI, разработанные в вегетационный период

Figure 7 – NDVI maps developed in the growing period

Поскольку на этих картах определены отрицательные значения NDVI (значения, приближающиеся к -1), соответствующие воде, это подтверждает существующие водные объекты в исследуемой области, которые не были отмечены на исходных данных. Далее для достижения цели точного земледелия были исследованы два испытательных поля. На основе оценки состояния этих полей были обнаружены области с наименьшими и наибольшими значениями NDVI, которые и показывают состояние растительности на исследуемый период времени. Тестовые сельскохозяйственные поля имеют следующие характеристики, указанные в табл. 8. На рис. 8 показаны выбранные сельскохозяйственные поля для дальнейшего анализа и оценки состояния сельскохозяйственных культур.

Таблица 8 – Основные характеристики тестовых полей

Table 8 – The main characteristics of testing fields

	Площадь, га	Тип культуры
Поле 1	6,52	пшеница
Поле 2	4,50	пшеница

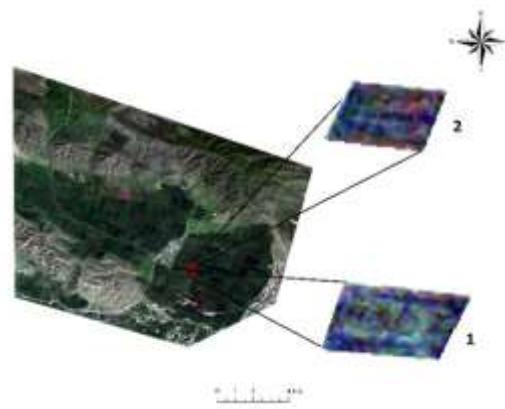


Рисунок 8 - Тестовые сельскохозяйственные поля

Figure 8 - Testing agricultural fields

Карты, описывающие динамику изменений вегетационного индекса в течение вегетационного периода для мониторинга тестовых полей, показаны на рис. 9.

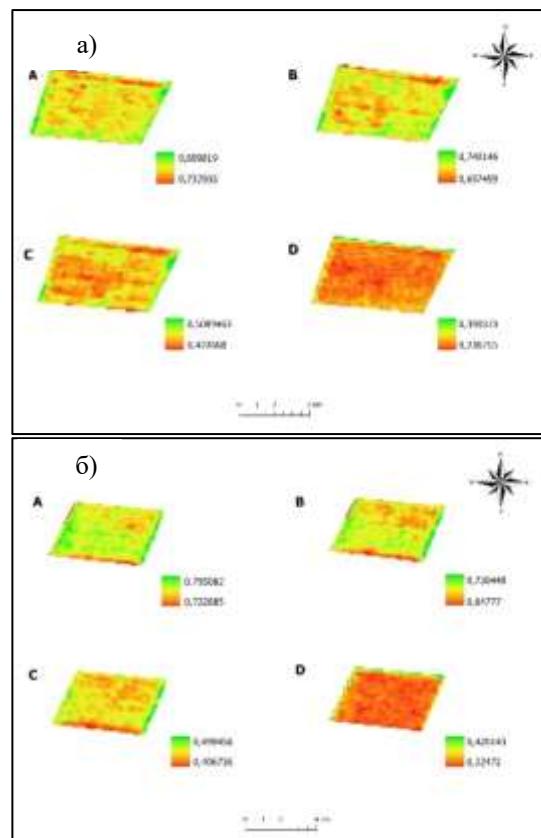


Рисунок 9 – Карты NDVI:
 (а) - первое поле, (б) - второе поле

Figure 9 – NDVI maps:
 (a) – first field, (b) – second field

В начале вегетации показатель увеличивается, в момент цветения его рост прекращается, затем по мере созревания NDVI снижается.

Как видно по карте, максимальное значение вегетационного индекса было выявлено в начале мая в период активного роста растений, которое \times составляет 0,809819 и 0,795082 для каждого тестового поля соответственно.

Заключение

В данном научном исследовании были продемонстрированы возможности машинного обучения для классификации сельскохозяйственных полей с целью точного земледелия. Для достижения предполагаемых результатов было опробировано три метода машинного обучения, такие как максимальное правдоподобие, машина опорных векторов и случайный лес. Исходными данными являлись спутниковые изображения Azersky и PlanetScope.

Одной из основных целей было достижение высокой точности классификации. По результатам исследования для изучаемых типов сельскохозяйственных культур была установлена точность классификации. Более высокий результат был получен в третьем эксперименте при классификации изображения Azersky с использованием метода случайного леса.

Для получения достоверных результатов были выбраны почти одинаковые условия для каждого выбранного метода обработки спутниковых данных. Было проведено три эксперимента с разным количеством классов и обучающих выборок для изображений Azersky и PlanetScope, полученных в один и тот же день, для сравнения и влияния количества этих выборок на точность классификации. Обращение к результатам с более высокой точностью показывает, что оптимизировать эту классификацию можно за счет уменьшения количества классов и увеличением количества выборок в классах.

Была использована верификация полученных результатов. После применения машинного обучения были обнаружены водные объекты на территории исследования, что является еще одним доказательством повышения точности классификации. Эти результаты были подтверждены расчетом вегетационного индекса, зафиксировавшего отрицательные значения, характерные для водных объектов.

Мониторинг двух тестовых сельскохозяйственных полей проводился на основе расчета вегетационного индекса, показатели которого соответствовали продуктивности тестовых сельскохозяйственных полей за рассматриваемый период времени.

Спутниковые изображения Azersky были предоставлены в рамках проекта ОАО Азеркосмос «Продвижение услуг дистанционного наблюдения Земли во имя устойчивого развития Азербайджана».

PlanetScope были приобретены через программу поддержки «Образование и исследования» компании Planet.

REFERENCES

1. **Shpaar D., Zakharenko A. V., Yakushev V.P., et al.** Precision Agriculture. Sankt-Peterburg: Pushkin, 2009: 397 (*in Russian*)
2. **Lupyan E.A., Tolpin V.A., Kashnitskiy A.V., Rybalko E.A., Baranova N.V.** Sovremennyye vozmozhnosti organizatsii distantsionnogo monitoringa vinogradnikov Respubliki Krym // Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem) "Primeneniye sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v selskom khozyaystve". Sankt-Peterburg. 16-17 sentyabrya 2015. SPb.: FGBNU AFI. 2015. S.66-69 (*in Russian*)
3. **Ustuner, M., Sanli, F. B., and Abdikan, S.** Balanced vs Imbalanced Training Data: Classifying Rapid Eye Data with Support Vector Machines, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B7, 379–384, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-379-2016>, 2016 (*in English*)
4. <https://developers.planet.com/tutorials/convert-planetscope-imagery-from-radiance-to-reflectance/> (*in English*)
5. **Pontus Olofsson, Giles M. Foody, Martin Herold, Stephen V. Stehman, Curtis E.Woodcock, Michael A. Wulde.** Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment. Volume 148, 25 May 2014, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015> (*in English*)
6. **Aliev B.H., Atabayev E.R., Zeynalova A.F.** Ecologically safe irrigation technology in the conditions of Azerbaijan. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 112-118 (*in Russian*)
7. **Giles M. Foody.** Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. Remote Sensing of Environment. Volume 239, 15 March 2020, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630> (*in English*)
8. **Sebastian Candiago, Fabio Remondino, Michaela De Giglio, Marco Dubbini, Mario Gattelli.** Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens.* 2015, 7(4), 4026-4047; <https://doi.org/10.3390/rs70404026> (*in English*)

A Mathematical Model for Accuracy Improvement of Determining the Radiative Characteristics of Objects on the Earth's Surface

B.M. Azizov, J.S. Mekhtiyev, H.N. Mammadov, S.H. Guliyeva

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

For correspondence:

Mekhtiyev Jafar / e-mail: lyamahm@yahoo.com

Abstract

Thermal infrared (IR) images obtained from satellites are widely used in various fields, including the study of the physical properties of the Earth's surface, the determination of the density of water, forecasting of forest fires, observation of volcanic phenomena, as well as the allocation of geological formations with various physical and chemical properties. Due to the low resolution of satellite thermal IR scanners, the interpretation of these images is complicated by the presence of numerous physical processes and usually requires taking into account a large number of different factors. A relatively simple mathematical model is proposed for a quantitative assessment of some factors. In this article, the development of a theoretical model for analyzing the temperature distribution on the Earth's surface is described.

Keywords: thermal, satellite image, infrared, earth, surface, physical, mathematical, model, agriculture, interpretation triangle.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_117_123

Revised 29.07.2020
Accepted 15.06.2022
Received 19.06.2022

For citation:

Azizov B.M., Mekhtiyev J.S., Mammadov H.N., Guliyeva S.H.
[A mathematical model for accuracy improvement of determining the radiative characteristics of objects on the Earth's surface]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 117-123 (in English)

Yerüstü obyektlərin şüalanma xarakteristikalarının hesablanmasının riyazi modelləşdirməsi

B.M. Əzizov, C.S. Mehdiyev, H.N. Məmmədov, S.H. Guliyeva

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

Yazışma üçün:

Mehdiyev Cəfər / e-mail: lyamahm@yahoo.com

Xülasə

Məqalədə bütün istilik axınlarını nəzərə alaraq yerüstü obyektlərin səthində temperatur paylanması analizini həyata keçirməyə imkan verən ərazinin topoqrafiyasına bağlanmış riyazi modelin təsviri təqdim edilmişdir. İstilik dəyişikliklərinin dinamikasının qiymətləndirilməsi üçün sistematik müşahidələrin hesabatının imkanı, regional xarakterli səhvlerin azaldılması və ətrafdakı obyektlərin şüalanma xarakteristikalarının təyin edilməsinin dəqiqliyinin yüksəlməsi göstərilmişdir.

Açar sözlər: istilik, peyk görüntüsü, infraqırmızı, torpaq, səth, fiziki-riyazi model, kənd təsərrüfatı, interpretasiya.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_117_123

УДК: 519.86

Математическое моделирование для учета радиационных характеристик наземных объектов

Б.М. Азизов, Д.С. Мехтиев, Х. Н. Мамедов, С.Х. Гулиева

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

Для переписки:

Мехтиев Əjafar / e-mail: lyamahm@yahoo.com

Аннотация

В статье представлено описание математической модели, привязанной к топографии местности, что позволяет анализировать распределение температур на поверхности наземных объектов с учетом всех тепловых потоков. Показана возможность учета систематических наблюдений для оценки динамики тепловых изменений, снижения региональных ошибок и повышения точности определения радиационных характеристик окружающих объектов.

Ключевые слова: тепловое, спутниковое изображение, инфракрасное, Земля, поверхность, физическая, математическая модель, сельское хозяйство, интерпретация.

Introduction

It is known that, in contrast to the background, in the decay processes of a number of long-lived radionuclides that constantly occur in nature, distinct temperature anomalies are created in separate parts of the earth's surface. These effects are characteristic, in particular, for significant areas contaminated with oil or ore processing wastes generated in the processes of their extraction and processing in significant areas of the majority of ore deposits. Furthermore, there are temperature anomalies caused by the transfer of energy, or the transportation of energy and, including those associated with certain types of malfunctions in the implementation of a number of types of technogenic activities [1-3].

Thus, this effect is inherent both in the areas of production and primary processing of radioactive substances and in territories characterized by an increased level of contamination with heavy oil components, in the composition of which there is a constant (over time) accumulation of long-lived radionuclides [4-9].

Various optical-electronic scanning devices (Landsat 7, 8 – ETM+; OLI; NOAA 18, 19 – VIIRS; Terra, Aqua – MODIS; Terra – ASTER and etc.) are used to observe temporal and spatial changes in the natural thermal radiation of the earth's surface. The interpretation of the relevant data is carried out by modern processing programs. However, the possibility of individual programs is limited only by a number of physical processes and factors affecting the final results. The programs used are based on fairly simple theoretical models built taking into account very severe restrictions and ideal meteorological and geological conditions. For

the practical application of these methods in real conditions, further improvement of technical observations and theoretical analysis is required [10-14].

Methodology and purpose of work

In order for accuracy improvement of interpretation of thermal IR information on the basis of the corresponding physical properties and processes, a mathematical model of the surface thermal transfer process associated with topography has been proposed.

Temperature is determined from the diffusion equation:

$$\gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

wherein $T=T(x,t)$ – the temperature at depth x from the surface; t - local time, measured from midday; γ - thermal diffusivity; ∂ - thermal conductivity.

The decision of the (1) for periodic heating at a given frequency ω is [6, 11].

$$T(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n \exp(-k\sqrt{nx}) \cos(ncot - \varepsilon_n - R\sqrt{nx}) \quad (2)$$

when D_n and ε_n - arbitrary coefficients;

$$R = \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma}} \text{ - wave number first harmonic}$$

Arbitrary coefficients D_n , ε_n are estimated under boundary conditions on the surface, expressed through the energy balance between the incident radiation of the Sun and the outgoing radiation of the Earth, taking into account the thermal conductivity of the corresponding environments. At the same time, the algorithms (MSD 14L; C6MODIS; C5MODIS) do not take into account atmospheric convection, thermal effects associated with the evaporation of water and the condensation of water vapor.

So, at $x = 0$

$$-K_{spec} \frac{\delta T(0,t)}{\delta x} = -\varepsilon \delta T^4 + I \quad (3)$$

wherein I – absorbing incident radiation, composed of shortwave solar radiation ($\lambda < 4$ mkm) and longwave atmospheric radiation ($\lambda > 4$ mkm), ε – average surface emissivity, δ – Stefan–Boltzmann constant, K_{spec} – thermal conductivity.

According to (3), the surface temperature is directly related to the radiative characteristics of the surface. It is known that the spectral distribution of thermal radiation of an absolutely black body is described by Planck's law:

$$W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (4)$$

wherein W_λ – radiation spectral density $vatt \cdot c^{-2} \cdot mkm^{-1}$; λ – the wavelength, mcm; T – black body temperature; C_1 and C_2 – optical coefficients.

The radiation density of real objects is always less than the density of radiation of an absolutely black body at the same temperature. The attitude of these values is called the emissivity of a real object and is determined by

$$\varepsilon = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) W_\lambda d\lambda \quad (5)$$

This parameter depends on the direction of measurement. The radiation W_λ incident on the onboard sensor is approximated using the equation

$$W_\lambda = W_{\lambda atm}(1 - \tau) + \varepsilon W_{\lambda earth} \tau \quad (6)$$

wherein $W_{\lambda atm}$ – radiation of the middle layer of the atmosphere; τ – atmospheric transmittance; ε – ground emissivity; $W_{\lambda earth}$ – radiation leaving the earth's surface.

In order to improve the accuracy of the thermal model of the Earth's surface, the radiation of a clear sky should be taken into account, the radiation of the clouds and the scanner onboard the satellite reacts to radiation over a portion of certain wavelengths and the filter functions.

Using the Laplace transform, Yacger derived the dependencies [15] between the surface radiation and its temperature and solved the resulting equation for the surface temperature using the iterative method

$$f_n = \frac{P}{\sqrt{\pi R}} \sum_{s=1}^m T_s \phi_{n-s+1} \quad n=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

wherein f_n – average radiation flux incident on the earth's surface in the n spectral interval;

$P = \frac{K_{spec}}{\sqrt{R}}$ Earth's thermal inertia; τ – heating flow period; T_s – average surface temperature in the S interval; ϕ – numerical coefficients determined only by the value of m – the total number of intervals for τ . The term f_n , equal to the right side of (3), contains the term with T_s^4 and therefore to find the T_s must use the iterative method.

The non-linear thermal transfer problem can also be approached using the finite difference method. To ensure convergence, careful selection of spatial and temporal steps is necessary. When using the method of finite differences and Laplace transforms, the physical meaning is obscured, which can lead to excessive computer time. Therefore, it was decided to linearize a member of the equation describing the radiation flux under boundary conditions, and then check the numerical results using a more accurate solution with the Laplace transform. Within the diurnal changes in the temperature of the investigated earth's surface, the results were quite satisfactory.

Formulation of the problem

It is known that incident radiation I consist of shortwave solar radiation I_s and longwave radiation of the sky. The latter can be approximated σT_{sky}^4 , where T_{sky}^4 – effective radiation temperature of the sky, therefore, the absorbed flux is $\varepsilon \sigma T_{sky}^4$. Then the long-wave components in the first part of the (3) can be linearized as

$$\varepsilon \sigma T^4 - \varepsilon \sigma T_{sky}^4 \sim 4 \varepsilon \sigma T_{sky}^3 (T - T_{sky}) \text{ at}$$

$$\frac{T - T_{sky}}{T_{sky}} \ll 1 \quad (8)$$

The solution of the diffusion (1), which satisfies the boundary condition (3), the modified expression (8), can be obtained by simple substitution. Let us assume that

$$\phi(x, t) = T - \frac{1}{h} \frac{\delta T}{\delta x} \quad (9)$$

$$\text{where } h = \frac{4 \varepsilon \sigma T_{sky}^3}{K} \text{ then } k \frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} = \frac{\delta \phi}{\delta t}$$

Satisfies the boundary condition at $x=0$

$$\phi = T_{sky} + \frac{I_s}{Kh} \quad (10)$$

where I_s - absorbed shortwave current. This term depends on the albedo of the earth's surface A , solar declination δ , geographic latitude λ , the slope of this surface and can be expressed as

$$I_s = (1 - A) S_0 C M(Z) \cos Z' \quad (11)$$

where S_0 - solar constant, C – coefficient taking into account the weakening of the solar flux cloud cover, $M(Z)$ - atmospheric transmission due to zenith angle, Z' - local zenith angle for incline. Atmospheric attenuation is approximately determined by law $\sqrt{\sec z}$;

Then

$$M(Z) = 1 - 0,2 \sqrt{\sec z} \quad (12)$$

where $\sec z = \cos \lambda \cos \delta + \sin \lambda \sin \delta$

The local zenith angle z' can be calculated by the formula

$$\cos z' = \cos d \cos z - \sin d (\sin \varphi \cos \delta \sin \omega t - \cos \varphi \sin \delta \cos \lambda - \sin \delta \sin \alpha \cos \omega t) \quad (13)$$

where d - angle of inclination measured from the horizon down, φ azimuth of the clockwise angle from the north direction. For convenience, in order to reduce the error associated with a regional feature, an additional parameter $H(t)$ should be defined, which expresses local insolation:

$$H = \begin{cases} M(z) \cos z', & -t_R < t < t_s \\ 0, & t_s < t < t_R \end{cases} \quad (14)$$

where t_R and t_s – time of sunset and sunrise local time, provided that $-t_R < t < t_s$, $\cos z > 0$ and $\cos z' > 0$.

Therefore

$$I_s = (1 - A) C H S_0 \quad (15)$$

and the boundary condition at $x = 0$ expressed by (8) takes the form

$$\phi = T_{sky} + (1 - A) \frac{S_0 C H}{Kh} \quad (16)$$

The solution of equation (10) satisfying condition (16) is

$$\phi(x, t) = T_{sky} + \frac{(1 - A) S_0 C}{Kh}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(-k\sqrt{nx}) \cos(n\omega t - \varepsilon_n - k\sqrt{nx}) \quad (17)$$

where A_n and ε_n – amplitude and phase of the harmonic components of local insolation H .

Surface temperature can be determined by integrating (2)

$$T(0, t) = h \int_0^{\infty} \phi(b, t) \exp(-hb) db = T_{sky} + \frac{(1 - A) S_0 C}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n \cos(n\omega t - \varepsilon_n - \delta_n)}{\sqrt{(h+k\sqrt{n})^2 + (k\sqrt{n})^2}} \quad (18)$$

$$\text{where } \delta_n = \arctg \left(k \frac{\sqrt{n}}{n} + k\sqrt{n} \right)$$

The solution of the problem

The effect of the underground heat flux (Q) can be taken into account if we add the second solution $T = \frac{Q_x}{K} + \frac{Q}{Kh}$, which satisfies the boundary condition (3), with a differential (1).

$$\text{Recall that } K = \sqrt{\frac{\omega}{2k}}; h = \frac{4\epsilon\sigma T_{sky}}{K}$$

$$\text{Input } r = P \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}$$

where $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ and $s=hK$.

$$\text{Then } k \sqrt{\frac{h}{n}} = r \sqrt{\frac{n}{s}} \text{ and}$$

$$\sqrt{kn + h^2} = h \sqrt{(r \sqrt{\frac{n}{s}})^2 + 1},$$

Therefore,

$$T(0, x) = T_{sky} + \frac{Q}{s} + (1 - A)S_0C \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{\cos(n\omega t - \epsilon_n - \delta_n)}{V(s+r\sqrt{n})^2 + (r+\sqrt{n})^2} \quad (19)$$

$$\delta_n = \arctg(r \sqrt{\frac{n}{s}} + r\sqrt{n})$$

$$r = F \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}$$

$$S = 4\epsilon\sigma T_{sky}^3$$

Average daily temperature T_{dc} is calculated by integrating (19) over a daily cycle

$$T_{dc} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T(0, t) dt = T_{sky} + \frac{Q}{s} + (1 - A)S_0CA_0 \cdot \cos \frac{\epsilon_0}{s} \quad (20)$$

where

$$A_0 \cos \epsilon_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau H(t) dt$$

It is important to note that the T_{dc} value does not depend on the thermal inertia of the earth's surface, and together with the

measured albedo values and topographic data, it can be used to estimate the subsurface heat flux Q .

The difference between day and night temperatures ΔT is calculated based on the difference between midday and midnight temperatures

$$\Delta T = T(0,0) - T\left(0, \frac{\tau}{2}\right). \quad (21)$$

The value ΔT that is a function of thermal inertia P can be determined by systematic observations and used to calculate changes in thermal inertia.

Conclusion

Thus, by making appropriate changes to existing information processing algorithms, it is possible to significantly improve the accuracy of determining the radiative characteristics of objects and the temperature distribution on the earth's surface. Satellite information obtained in the thermal IR spectrum is used in various geological and natural fields. Since the interpretation of such information is complicated by the influence of numerous factors, the developed model makes it possible to determine the optimal observation time for obtaining quantitative characteristics of various surface properties. It is established that the ratio of the difference between day and night temperatures to the albedo value depends only on the thermal inertia, and therefore it can be used to isolate geological objects.

The dependence of thermal inertia on density, water content and to some extent on the composition and condition of vegetation cover suggests that the described method will be useful for detecting and accurately predicting the incidence of agricultural crops.

REFERENCES

1. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer. 2012 *Int. J. Rem. Sens.* 2014, v.35. 15 (*in English*)
2. Mektiyev A.Sh., Azizov B.M., Mekhtiyev J.S. Determination of the thermophysical characteristics of oil-contaminated soils by remote sensing. *Reports of National Academy of Science of Azerbaijan*, 2005 v,1, pp.170-179 (*in Russian*)
3. Mekhtiyev J.S., Sultanov J.A., Azizov B.M. To the calculation of radiation fields of chemical pollution of nature using adigital model. *Proceedings of the Fifth International Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Physics"*, Baku, 2008. Pp. 200-202. (*in English*)
4. Nicodemus F. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface *Appl.Opt.* 4.767, 1965 (*in English*)
5. Smirnov N.V., Dunin-Barkovsky I.V. A short course in mathematical statistics M. Phys-Mat, 1959. 264 p. (*in Russian*)
6. Vilor N.V., Abushchenko N.A., Lepin V.S. Infrared radiation of the earth's surface in the arid climate zone *DAN RF*. 2003.V. 388. No. 5, S.674-672 (*in Russian*)
7. Bonan G. (2008). *Ecological climatology, concept and applications*. Cambridge University Press,550 p. (*in English*)
8. BrovkinV., Ganopolski A., Svirezhev Y. A continuous climate-vegetation classification for the use in climate -biosphere studies. *Ecological Modelling* 101: 251-261 (1997) (*in English*)
9. Budyko M.I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus* 21:611-619 (1969) (*in Russian*)
10. Bytiev Yu. P. *Mathematical methods of interpreting an experiment* M.1989 (*in Russian*)
11. Giglio L., Desclaitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS *Rem. Sens. Env.* 2003, v.87, P.273-282 (*in English*)
12. Jaeger J.C. Pulsed surface heating of a semi-infinite solid. *Quart.Appl. Math.*, 1983, vol.11, pp. 132-137 (*in English*)
13. Aliyev I.M. On a mathematical model for evaluating them etiological characteristics of measuring system and its links under real operating conditions. *Reports of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR* 1983. No. 11 p.43-46 (*in Russian*)
14. Anding D. Band-Model Methods for Computing Atmospheric Stint-Path Molecular Absorption IRIA of the Report 714-21-1. February,1999 (*in English*)
15. Arakawa A., Lamb V. Computational design of the basic dynamical processes in the UCLA general circulation model. "In General circulation models of the atmosphere", methods in computational physics, 17, J. Chang, editor, Academic Press, 1977, pp.174-264 (*in English*)

Mathematical Assessments Dashkesan Mining Industry Waste

G.X. Karimova

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

For correspondence:

Karimova Gulnara / e-mail: ekologiya.qrup.85@mail.ru

Abstract

The paper studies the issues of mathematical assessment of mining industry waste located on the territory of Dashkesan. In particular, the analysis of information on man-made waste in connection with the minimization of waste generated at mineral deposits, the search for optimal operating conditions, research based on the basic principles of modeling physical processes.

Keywords: technogenic waste, mathematical modeling, minerals, mineral waste.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_124_130

Accepted 02.09.2021
Received 18.06.2022
Revised 23.06.2022

For citation:

Karimova G.X.

[Mathematical assessments Dashkesan mining industry waste]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 124-130 (in Azerbaijani)

Daşkəsən dağ-mədən sənayesi tullantılarının riyazi qiymətləndirilməsi

G.X. Karimova

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

Yazışma üçün:

Kərimova Gülnarə / e-mail: ekologiya.qrup.85@mail.ru

Xülasə

Məqalədə Daşkəsən ərazisində yerləşən dağ-mədən sənayesi tullantılarının riyazi qiymətləndirilməsi məsələləri nəzərdən keçirilmişdir. O cümlədən, faydalı qazıntı yataqlarında yaranan tullantıların minimuma endirilməsi, optimal istismar şəraitinin axtarışı ilə əlaqədar texnogen tullantılar haqqında informasiyanın analizi fiziki proseslərin modelləşdirilməsinin baza prinsiplərinə əsaslanan araşdırılmaları aparılmışdır.

Açar sözlər: texnogen tullantılar, riyazi modelləşdirmə, faydalı qazıntı, mineral tullantılar

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_124_130

УДК: 621.762.4

Математические оценки отходов горнодобывающей промышленности Дашкесана

Г.Х. Каримова

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

Для переписки:

Каримова Гульнара /e-mail: ekologiya.qrup.85@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы математической оценки отходов горнодобывающей промышленности, находящихся на территории Дашкесана. Дан анализ информации о техногенных отходах в связи с минимизацией отходов, образующихся на месторождениях полезных ископаемых. Рассмотрен вопрос поиска оптимальных условий эксплуатации, приведены исследования на основе основных принципов моделирования физических процессов.

Ключевые слова: техногенные отходы, математическое моделирование, полезные ископаемые, минеральные отходы.

Giriş

Daşkəsən Azərbaycanın yüksək iqtisadi potensiala malik aparıcı sənaye regionudur. Bu region onilliklər ərzində toplanıb qalmış müxtəlif texnogen mineral tullantıların böyük ehtiyatlarına malikdir. Bu tullantılar əsasən dağ-mədən, metallurgiya və digər sahələrin texnogen fəaliyyəti nəticəsində yaranmışdır.

Faydalı qazıntı yataqlarında yaranan tullantıların minimuma endirilməsi optimal istismar şəraitinin axtarışı ilə əlaqədardır. Bu məqsədlə mineral resursların istismar rejiminin optimallaşdırılması modelləri istifadə oluna bilər. Texnogen tullantılar haqqında informasiyanın analizi fiziki proseslərin modelləşdirilməsinin baza prinsiplərinə əsaslanır.

İşin məqsədi

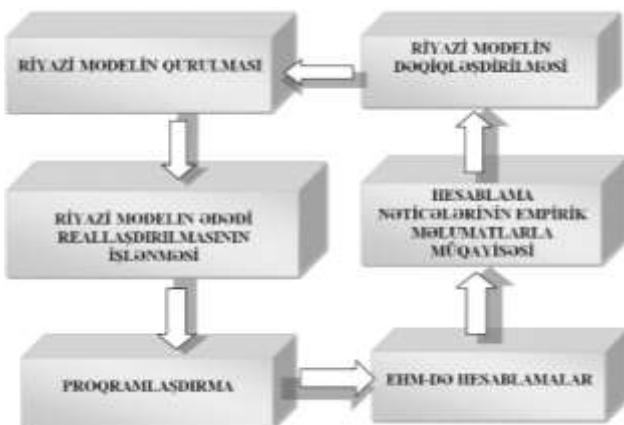
Texnogen tullantıların yaranmasının qanunauyğunluğu birinci dərəcəli diferensial tənliklərlə yazılıalaraq, riyazi programlaşdırma məsələsinə gətirilməsi və bu tənliklərdə əsas dəyişənlər texnoloji əməliyyatların enerji tutumu və vaxtı olmaqla, riyazi modellərin parametrlərini qeyri-xətti ən kiçik kvadratlar metodu ilə qiymətləndirməkdir.

Məsələnin qoyuluşu

Modelləşdirmənin metodoloji prinsiplərinin əsasında “model” anlayışı durur, bu anlayış tədqiq olunan obyektin obrazı kimi başa düşülür. Onda modelləşdirməyə obyektlər sisteminin modellərinin qurulması və öyrənilməsi prosesi kimi baxıla bilər. Bu və ya digər ərazidə mineral tullantılar qiymətləndirilərkən iki mərhələ fərqləndirilir. Birincisi, müşahidə və təcrübə mərhələsidir, burada tədqiqatçı zəruri informasiya toplayır. 2-ci mərhələ toplanmış məlumatların ümumiləşdirilməsi və nəticələr çıxarılmasından ibarət olur [1-6].

Tullantılar dair informasiyanın öyrənilməsi prosesi də mərhələli prosesdir, birincidə

empirik informasiyanın məkan-zaman paylanması dəqiqləşdirilir. İkinci mərhələdə öyrənilən obyektin təsviri, ümumiləşdirilməsi və nəzəri modelin qurulması həyata keçirilir. Üçüncü mərhələdə ekoloji-riyazi modelin fiziki proseslərlə adekvatlığı yoxlanılır. Deməli, konkret ərazidə mineral ehtiyatlara dair informasiyanın ekoloji-riyazi analiz prosesi belə təsvir oluna bilər: tullantılar dair məlumatların toplanması → tullantıların məkan-zaman paylanması modelinin qurulması → modelləşdirmə nəticələri əsasında texnoloji proseslərin optimallaşdırılması. Tullantıların idarə olunması üçün ekoloji-riyazi modellərin qurulması alqoritminin sxemi şək. 1-də təqdim olunur.



Şəkil 1 – Riyazi modelin qurulması alqoritminin sxemi

Figure 1 – Schematic of the algorithm for building a mathematical model

Beləliklə, ekoloji-riyazi modellər tullantıların emalı üzrə texnoloji proseslərin fiziki mahiyyətini əks etdirən metodoloji prinsipləri əhəmiyyətli dərəcədə zənginləşdirir və mineral ehtiyatların rasional istifadəsi üçün yeni imkanlar açır. Ekoloji-riyazi modelin parametrlərini dəyişməklə və EHM-də müxtəlif hesablama eksperimentləri aparmaqla modelləşdirilən obyektin xassələrinin necə dəyişməsini proqnozlaşdırmaq olar.

Ədədi hesablama eksperimentləri nəticəsində alınmış informasiyanı emal edərək, riyazi modeli mühəndis düsturlarınadək sadələşdirmək olar. Bu düsturlar mürəkkəb ilkin modelə və böyük həcmli hesablama məlumatlarına əsaslanır. Belə düsturlar daha sadə üsulla zəruri informasiya əldə etməyə imkan verir.

Riyazi modellərin inkişafının əsas yolu induktivlik, yəni sadədən mürəkkəbə doğru yol hesab olunur. Ancaq digər yol da az əhəmiyyətli deyil: deduksiya, yəni ümumi konsepsiyanın xüsusi modellərə, yəni konkret siyuasiyanı təsvir edən modellərlə keçmək. Belə modellər xüsusən sənaye ekologiyası problemlərinin mühəndis təcrübəsi üçün çox əhəmiyyətlidir.

Məsələnin həlli

Adaptasiyalı modellər təbii resursların rasional istifadəsi məsələlərinin həllində səmərəli hal kimi təqdim oluna bilər. Belə modellərin qurulması xüsusi ekoloji riyazi təhlilin aparılması nəticəsində mümkün ola bilər.

Məlumdur ki, dağ-mədən sənayesi tullantıları əsasən bərk tullantılardan ibarət olur. Filiz emalı texnoloji prosesi istənilən texnoloji proses kimi enerji tutumu ilə xarakterizə olunur. Tamamilə aydınlaşdır ki, sərf olunan enerji-

nin bir hissəsi tullantıların “istehsalına” sərf olunur.

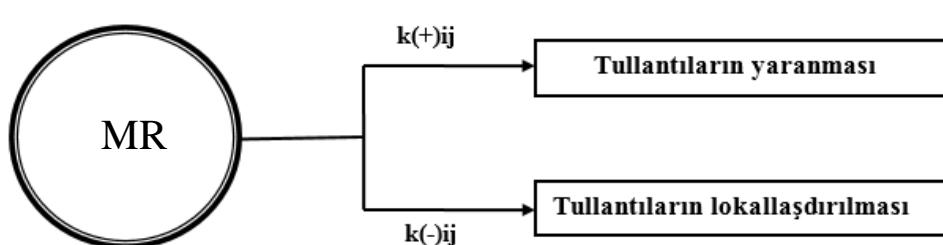
Onda ekoloji göstərici qismində texnoloji prosesin enerji tutumunu seçmək olar. Bu fərziyyə ekoloji informasiyanın riyazi analiziinin klassik aparatını istifadə etməyə imkan verir. Bu tərzdə alınmış riyazi modelin parametrləri empirik informasiyalar əsasında müəyyən edilir. Dağ-mədən müəssisəsində tullantıların yaranmasının kinetik modelinin hesabi sxemi şəkil 2-də təqdim olunur.

Dağ-mədən sənayesi tullantılarının yaranması və lokallaşdırılmasının stasionar prosesi aşağıdakı sürətlərlə xarakterizə edilir:

$$W_{(+ij)} = \frac{dM_{(+ij)}}{d\Theta} = k_{(+ij)}(M_{0ij} - M_{ij}), \quad (1)$$

$$W_{(-ij)} = -\frac{dM_{(-ij)}}{d\Theta} = k_{(-ij)}M_{(ij)}, \quad (2)$$

burada $M_{(+ij)}$ – j-ci mənbədən yaranan i-ci növ tullantıların kütləsi; Θ – araşdırılan texnoloji prosesin və ya bütövlükdə istehsalın enerji tutumu; $k_{(+ij)}$, $k_{(-ij)}$ – tullantıların yaranma və lokallaşdırılması sürəti sabitləri; M_{0ij} , M_{ij} – ətraf mühitdə j-ci mənbədən i-ci növ tullantıların kütləsinin ilkin və cari qiymətləridir.



Şəkil 2 - Tullantıların yaranma sxemi: MR - material resursları, k , i , j - tullantıların yaranması və lokallaşdırılması proseslərinin sürət əmsalları

Figure 2 - Waste generation scheme: MR - material resources, k , i , j - velocity coefficients of waste generation and localization processes

Tarazlıq vəziyyətinə baxaraq, alarıq:

$$M_{Pij} = M_{\infty ij} = \frac{k_{(+)}ij}{k_{(+)}ij + k_{(-)}ij} M_{0ij}, \quad (3)$$

(1) - (2) ifadələri tullantıların yaranmasının stasionar prosesinin riyazi modelini yazmağa imkan verir:

$$\frac{dM_{ij}}{d\Theta} = \beta_{ij} (M_{\infty ij} - M_{ij}), \quad (4)$$

burada $M_{ij} \int_{\Theta=0}^t = 0; \beta_{ij} = k(+ij) - k(-ij);$
 $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m.$

(4) tənliyinin həlli belə şəkil alır:

$$M_{ij} = M_{\infty ij} [1 - \exp(-\beta_{ij}\Theta)]. \quad (5)$$

Beləliklə, tullantıların yaranmasının stasionar prosesi aşağıdakı sürətlərlə xarakterizə olunur:

$$W_{(+)}ij = \frac{dM_{(+)}ij}{d\Theta} = k_{(+)}ij (M_{0ij} - M_{ij}) M_{ij}, \quad (6)$$

$$W_{(-)}ij = \frac{dM_{(-)}ij}{d\Theta} = k_{(-)}ij M_{ij}^2 \quad (7)$$

Tullantıların yaranması stasionar prosesinin riyazi modeli belə yazılı bilər:

$$\frac{dM_{ij}}{d\Theta} = (\varepsilon_{ij} - \beta_{ij} M_{ij}) M_{ij} \quad (8)$$

(8) tənliyini sabit ilkin şərt üçün belə yazmaq olar:

$$M_{ij} = M_{Hij} \exp(\varepsilon_{ij}\Theta) [1 - \gamma_{ij} \exp(-\varepsilon_{ij}\Theta)], \quad (9)$$

burada $\gamma_{ij} = M_{Hij} M_{0ij}^{-1}$.

Tullantıların yaranmasının qeyri-stasionar prosesinin riyazi modeli belə şəkil alır:

$$\frac{\partial M_{ij}}{\partial t} + \alpha_{\Theta} \frac{\partial M_{ij}}{\partial \Theta} = \beta_{ij} (M_{\infty ij} - M_{ij}), \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{ij}(\Theta, 0) &= M_{0ij} = \text{const} \\ M_{ij}(0, t) &= M_{Hij} = \text{const} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

burada zaman trendi $\Theta(t) = \Theta_0 + \alpha_{\Theta} t$.

Texnoloji proseslərin enerji tutumundan asılı olaraq tullantıların yaranma dinamikası aşağıdakı kimi yazılı bilər:

$$M_{ij}(\Theta, t) = \begin{cases} M_{\infty ij} + (M_{0ij} - \beta M_{\infty ij}) \exp[-\gamma_{ij} \alpha_{\Theta}^{-1} (\Theta - \Theta_0)] & \text{hansı ki } t \geq \Theta \alpha_{\Theta}^{-1}, \\ M_{\infty ij} + (M H_{ij} - M_{\infty ij}) \exp(-\beta_{ij} \alpha_{\Theta}^{-1} \Theta) & \text{hansı ki } t \leq \Theta \alpha_{\Theta}^{-1}. \end{cases} \quad (12)$$

Ödədi eksperimentlərin nəticələri və tullantıların ətraf mühitə təsirinə dair məlumatlarla müqayisəsi göstərmişdir ki, faktiki məlumatlarla daha yaxşı uzlaşma (12) asılılığında təmin olunur.

Bu riyazi modelin parametrlərinin qiymətləndirilməsi ən kiçik kvadratların qeyri-xətti metodu ilə yerinə yetirilir.

Bunun üçün aşağıdakı regressiya modeli istifadə olunur:

$$\begin{aligned} M_{ij} &= M_{Hij} \exp(\varepsilon_{ij}\Theta) \\ &\quad [1 - \gamma_{ij} \exp(-\varepsilon_{ij}\Theta)] + \varepsilon_k \end{aligned} \quad (13)$$

burada

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, N; M(\varepsilon_k) = \\ &= 0; D(\varepsilon_k) = r_k^2; \text{cov}(\varepsilon_k, \varepsilon_L) = 0, k \neq L. \end{aligned}$$

Parametrlərin qiyməti ən kiçik kvadratların modifikasiya olunmuş kriteriyasının (F) minimallaşdırılması yolu ilə belə tapılır:

$$F = \sum_{k=1}^N \left\{ \frac{M_{ijk} - M_{Hijk} \exp(\varepsilon_{ij}\Theta)}{[1 - \gamma_{ij} \exp(-\beta_{ij}\Theta_k)]} \right\}^2, \quad (14)$$

$$\lambda_k = \sigma_k^{-2}; \lambda_k \Rightarrow \min_{\{M_{\infty ij}, \beta_{ij}\}}, \quad (15)$$

burada M_{ijk} – enerji tutumuna uyğun j -ci mənbədən yaranan i -ci növ tullantılarının eksperimental qiymətidir.

Təklif olunan riyazi modelin adekvatlığı tullantıların yaranma prosesinə tətbiqən qiymətləndirilmişdir (cədv.).

Tullantıların bu növü üçün 15 modelinin aşağıdakı xüsusi halı istifadə olunmuşdur:

Cədvəl – Tullantıların yaranma prosesinin riyazi modellərinin parametrləri

Table – Parameters of mathematical models of waste generation process

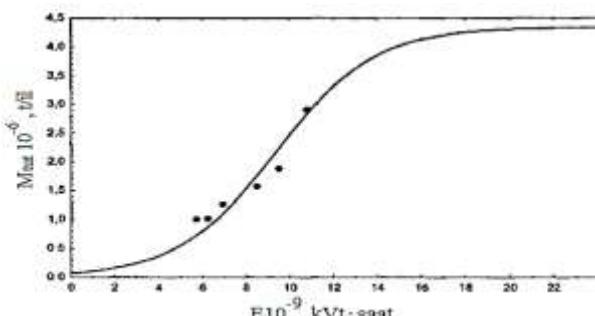
Proses	K, Mt/il	R, 1/QVt·saat	M(0), Mt/il
Çirkənləndirici maddələrin tutulması	4,345	0,442	0,0684
Stasionar mənbələrdən tullantılar	1,401	0,269	0,06681

$$M(\varTheta) = \frac{M(0)K \exp(r\varTheta)}{[K - M(0) + M(0)\exp(r\varTheta)]} \quad (16)$$

və ya

$$\frac{dM}{d\varTheta} = rM \left(1 - \frac{M}{K}\right) \quad (17)$$

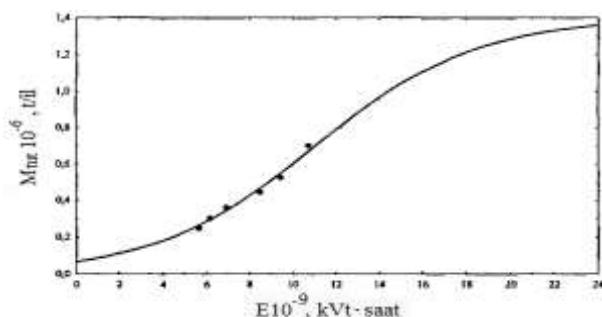
Şək. 3 və 4-də faktiki məlumatlarla hesablama qiymətlərinin müqayisə nəticələri təqdim olunmuşdur.



Şəkil 3 – Tutulan çirkənləndirici maddələrin kütləsi ($r=0,96$)

Figure 3 – Mass of captured pollutants ($r = 0.96$)

Müqayisə (15) qanuna uyğunluğunun yüksək adekvatlığına dəlalət edir. Deməli, ətraf mühitə təsirin qiymətləndirilməsi üçün texnoloji prosesin enerji tutumunun istifadə olunması fiziki cəhətdən əsaslıdır.



Şəkil 4 – Çirkənləndirici maddələrin ümumi kütləsi ($r=0,98$)

Figure 4 – Total mass of pollutants ($r = 0.98$)

Tullantıların yaranma kinetikası isə birinci dərəcəli diferensial tənliklə ifadə olunur. Bu riyazi modelin parametrləri ən kiçik kvadratların qeyri-xətti metodu ilə qiymətləndirilə bilər.

Nəticə

Təsdiq olunmuşdur ki, texnogen tullantıların yaranmasının qanuna uyğunluğu birinci dərəcəli diferensial tənliklərlə yazılı bilər, bu tənliklərdə əsas dəyişənlər texnoloji əməliyyatların enerji tutumu və vaxtıdır, riyazi modellərin parametrlərini isə qeyri-xətti ən kiçik kvadratlar metodu ilə qiymətləndirmək olar.

Nəzəri təhlil və ədədi eksperimentlərin nəticələri göstərmişdir ki, texnogen tullantıların stasionar yaranma prosesinin riyazi modeli kifayət qədər yüksək adekvatlıqə malikdir.

REFERENCES

1. **Armand D.L.** Nauka o landshafte (osnovy teorii i logikomatematicheskie metody). M.: *Mysl*, 1975, 325 s. (*in Russian*)
2. **Veltishcheva N.S.** Metody modelirovaniya promyshlennogo zagryazneniya atmosfery. Obninsk: *VNIIGMI*, 1975, 37 s. (*in Russian*)
3. **Moiseenkova T.A.** Ekologo-ekonomiceskaya sbalansirovannost promyshlennyh uzlov. Saratov: *Izdatvo un-ta «Saratov»*, 1989, 216 s. (*in Russian*)
4. Advanced Thermoplastic Composites: Charact erization and Processing. Edited by Haus-Henning Kausch in Collaboration with Roger Legres. Munich, Vienna, New-York, Barselona, *Hauser Publishers*, 1993, 370 p. (*in English*)
5. **Əhmədov Ş.Ə., Əhmədova M.Ş.** Qlobal iqlimin çoxillik dəyişmələrinin mövsümi xüsusiyyətləri və onların səbəbləri. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, c.11, №2, 2019 (*in Azerbaijani*)
6. **Əhmədov Ş.Ə., Hüseynova H.Ş., Əskərova N.Z.** Qlobal iqlim dəyişmələrinə təsir edən mümkün səbəblər. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının xəbərləri*, 2020. №4, c.122-126 (*in Azerbaijani*)

MƏQALƏLƏRİN TƏRTİBATI QAYDALARI

Jurnalın redaksiya heyəti jurnalın elmi istiqamətinə uyğun gələn, heç bir yerdə nəşr olunmayan, digər jurnallara verilməyən məqalələrin əlyazmalarına baxır.

Hazır məqalə redaksiyaya, amaxeber@yahoo.com elektron ünvanında göndəriləməlidir.

Məqalə azərbaycan, ingilis və ya rus dillərində 10 səhifədən çox olmamaq şartılı yazıla bilər və aşağıdakılardı özündə eks etdirməlidir:

1. Məqalənin adı, müəlliflərin A.A. Soyadı, hər bir müəllifin çalışdığı müəssisənin adı və ünvanı;

2. Müəlliflərdən birinin E-maili;

3. Annotasiya, 1000 simvol;

4. Ağar sözlər, 6 sözdən çox olmayıraq;

Bütün bu məlumatlar hər üç dildə təqdim olunmalıdır.

5. *Giriş, İşin məqsədi, Məsələnin qoyuluşu, Məsələnin həlli, Nəticə - bölmələri ilə məqalənin mətni;*

6. UOT kodu;

7. İstifadə olunmuş mənbələrin latin dilində transliterasiya edilmiş mətninin siyahısı (7-10 aralığında), mənbə haqqında tam məlumat. Həmçinin "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri" jurnalına istinad. Siyahı təsadüfi yolla deyil, mətndəki istinadların sırasına əsasən (1, 2, 3...) tərtib olunur.

8. Şəkil və 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 mütəxəssislər 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 redaktə etmək hüququna malikdir.

Mətnin yenidən yiğilması zamanı yaranan biləcək nöqsanları aradan qaldırmaq məqsədi ilə məqalə mətni Word for Windows formatında, Times New Roman 12 şrifti, 1,15 interval ilə elektron şəklində redaksiyaya təqdim edilməlidir.

Əlyazmanın nəşri üçün müəlliflərə ödəniş alınmır.

Daha çox məlumat və məqalənin tərtibatı nümunəsi saytda: ama.com.az

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Редколлегия журнала рассматривает статьи, которые соответствуют научному профилю журнала, нигде ранее не опубликованы и не переданы в редакции других журналов.

Готовую статью следует направить в редакцию на e-mail: amaxeber@yahoo.com.

Статья может быть написана на азербайджанском, английском либо русском языке общим объемом не более 10 страниц. и должна включать в себя:

1. Название статьи, И.О. Фамилию авторов, наименования и адреса организаций, где работают авторы;

2. E-mail одного из авторов для переписки;

3. Аннотацию (около 1000 символов);

4. Ключевые слова (до 6 слов).

Вся вышеперечисленная информация должна быть переведена на три языка.

5. Текст статьи с разбивкой на Введение, Цель работы, Постановка задачи, Решение задачи, Заключение;

6. Код УДК;

7. Транслитерированный на латинице список использованной литературы (в пределах 7–10) с указанием полных библиографических данных об источнике. В том числе ссылка на журнал «Вестник Азербайджанской Инженерной Академии». Список составляется в порядке указания ссылок в тексте по возрастанию: 1, 2, 3..., а не вразброс.

8 Названия рисунков и таблиц на языке написания статьи плюс их перевод на английский язык. Рисунки и таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи рядом со ссылками на них.

Поступившие в редакцию рукописи проходят процедуру проверки на плагиат. Индекс оригинальности должен составлять не менее 75%.

Статьи рецензируются докторами и кандидатами наук, назначаемыми редакционной коллегией. К рецензированию статей привлекаются: члены редколлегии, редсовет и ведущие специалисты. Срок рецензирования составляет до 3 месяцев. В случае замечаний к статье редакция свяжется с автором. После повторного авторского редактирования статья направляется для повторной рецензии, а затем на основании окончательного заключения рецензента редколлегия утверждает статью для публикации либо отклоняет. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения.

С целью исключения опечатки при верстке статьи просьба присыпать текст и рисунки в электронном виде в формате Word for Windows, шрифт Times New Roman 12, интервал 1,15.

Плата с авторов за публикацию рукописи не взымается.

Более подробная информация и образец оформления статьи – на сайте: ama.com.az

ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES

The editorial board of the journal reviews articles that correspond to the scientific profile of the journal, have not been published anywhere and have not been submitted to the editors of other journals.

The finished article should be sent to the editorial office by e-mail: amaxeber@yahoo.com

The article can be written in any of three languages: Azerbaijani, English or Russian (max 10 pp.) and must include:

1. Title of the article, Name, Middle Name (if applicable), Surname of authors, names of organizations of each author and addresses of organizations;

2. E-mail of one of the authors;

3. Annotation (about 1000 characters);

4. Key words (up to 6 words).

All of the above information must be translated into three languages.

5. The text of the article with a breakdown into *Introduction, Purpose of work, Problem statement, Problem solution, Conclusion*.

6. Universal Decimal Classification code, also known as УДК.

7. The transliterated in the Latin alphabet the list of used References (min 7 – max 10) with full bibliographic data on the source, including a link to journal "Herald of the Azerbaijan Engineering Academy". The list is compiled in the order of the references in the text (1, 2, 3 ...), and not randomly.

8. Titles of figures and tables in the language of writing the article plus their translation into English. Figures and tables are located directly in the text of the article next to the mandatory links to them.

The submitted manuscripts undergo a plagiarism check procedure. The originality index must be at least 75%.

Articles are reviewed by doctors or candidates of sciences appointed by the editorial board. The following are involved in reviewing articles: members of the editorial board, editorial board and leading experts. The review period is up to 3 months. In case of comments on the article, the editors will contact the author. After repeated author's editing, the article is sent for re-review, and then, based on the final opinion of the reviewer, the editorial board approves the article for publication or rejects it. The editors reserve the right to make editorial changes.

In order to avoid typing errors in the layout of the article, please send the text and figures in electronic form using format .docx of Microsoft Word, and font Times New Roman 12, interval 1,15.

No fee is charged from the authors for the publication of the manuscript.

More detailed information and a sample article formatting can be found on the website: ama.com.az

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

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

ВЕСТНИК
Азербайджанской Инженерной Академии
Международный научно-технический журнал

Cild 14. № 2
Vol. 14. № 2
Том 14. № 2

BAKİ – 2022

İnformasiya şöbəsinin müdürü
Naila 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 imzalanıb 25.06.2022,
formatı 60x84 1/8,
kağız ofset, f.ç.v. 16.5
Tirajı 1105 əd.*