



**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 17. № 3

Vol. 17. № 3

Том 17. № 3

BAKİ – 2025

Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının XƏBƏRLƏRİ

Beynəlxalq elmi-texniki jurnal

Baş redaktor – akademik A.M. Paşayev

Baş redaktorun müavini – akademik Ə.X. Cənəhmədov

Məsul katib – müxbir üzv M.H. Həsənov

REDAKSIYA HEYƏTİ:

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

REDAKSIYA ŞURASI:

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

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

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

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

Executive secretary – corresponding member M.H. Hasanov

EDITORIAL BOARD:

academician **A.M. Abbasov**, academician **B.H. Aliev**, academician **K.A. Asgarov**,
academician **N.H. Javadov**, academician **M.Y. Javadov**, corresponding member **A.G. Huseynov**,
academician **A.Y. Grigoriev** (*Belarus*), academician **B.V. Gusev** (*Russia*),
corresponding member **K.T. Nabizada**, academician **H.A. Mammadov**, academician **G.H. Mammadova**,
academician **H.F. Miralamov**, academician **S.Y. Muslimov**, corresponding member **S.R. Rasulov**,
professor **V.M. Valiev**

EDITORIAL ADVISORY BOARD:

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

TƏSİSÇİ: “Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası” ictimai birliyi.

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

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyində qeydiyyatda alınmışdır.

Qeydiyyat № 2965, 23.06.2009-cu il.

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

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

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

Jurnal Crossref təşkilatının üzvüdür. Nəşr olunmuş məqalələrə DOI (Obyektin Rəqəmsal İdentifikatoru) verilir.

Jurnal International Scientific Indexing (ISI), Scientific Journal Impact Factor (SJIF), Cosmos Impact Factor (CIF), ASCI Beynəlxalq Elmi Sitalaşma Bazalarına yerləşdirilib, SERTİFİKATLAR verilib, impekt faktor ISI – 2.336, impekt faktor SJIF – 8.503 və impekt faktor CIS – 3.459 (2023).

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

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

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

Redaksiyanın ünvanı:

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

Journal is membership of Crossref organization. All articles are assigned the DOI (Digital Object Identifier).

Journal was included into International Scientific Indexing (ISI), Scientific Journal Impact Factor (SJIF), Cosmos Impact Factor (CIF), ASCI, issued a CERTIFICATE, impact factor ISI – 2.336, impact factor SJIF – 8.503, and impact factor CIS – 3.459 (2023).

Journal licensed under Creative Commons Attribution – NonCommercial 4.0.

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

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

Address of editorial offices:

Pushkin str., 30, 3 floor,
Baku, AZ1010,
Azerbaijan Republic
Tel/Fax: (+99412) 598 24 52
<https://www.ama.com.az/>
<https://journal.ama.com.az/>
E-mail: amaxeber@gmail.com
journal@ama.com.az
index@ama.com.az

УЧРЕДИТЕЛЬ: Общественное объединение «Азербайджанская Инженерная Академия».

Журнал издается с ноября 2009 года. Периодичность: 4 раза в год.

Зарегистрирован Министерством Юстиции Азербайджанской Республики. № регистрации: 2965 от 23.06.2009 г.

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

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

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

Журнал член организации Crossref. Опубликованным статьям присваивается Цифровой Идентификатор Объекта DOI.

Журнал размещен в Международных базах научного цитирования International Scientific Indexing (ISI), Scientific Journal Impact Factor (SJIF), Cosmos Impact Factor (CIF), ASCI, выданы СЕРТИФИКАТЫ, импект фактор ISI – 2.336 и импект фактор SJIF – 8.503 и импект фактор CIS – 3.459 (2023).

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

Журнал представлен к размещению в международной базе научного цитирования Web of Science (WoS).

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

Адрес редакции:

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



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

© Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası, 2025
© Azerbaijan Engineering Academy, 2025
© Азербайджанская Инженерная Академия, 2025

M Ü N D Ə R İ C A T

Mexanika və maşınqayırma

Paşayev A.M., Əsgərov K.A., Allahverdiyev K.R. Yüksək çözünlüklü optik spektroskopiya ilə araşdırılan yüksək anizotrop üçlü TlGaSe ₂ kristallarında faza keçidləri	7
Canəhmədov Ə.X., Volçenko D.A., Cavadov M.Y., Fidrovskeya N.N., Volçenko N.A., Vozniy A.V. Qazıma bucurqadının bir diskli kündəli əyləcinin gərginlik-deformasiya vəziyyəti	15
Eqorov A.G., Göyüşov R.Q., Abdullayev O.M. Sualtı texniki təminat gəmisinin əsas ölçülərinin müəyyənəşdirilməsində kabel düzmə avadanlığının təsirinin analizi	25
Hüseynov Ə.G., Kərimov A.F. Daxili yanma mühərrikinin paylayıcı valının yeyilməsinin öyrənilməsi	35

Neft və qaz

Dadaşzadə X.İ., Mahmudova V.Z. Boru kəmərlərində və laylarda elastik-özlüplastik mayenin hərəkətinin xarakterik xüsusiyyətləri	47
Qurbanov Ə.N., Sardarova İ.Z., Əliyev C.R., Nurməmmədova-Hüseynova S.B. Magistral boru kəmərlərində qazın nəqlinin araşdırılması	56
Əliyeva O.Ə., Əliyev Ə.S. Məsələli mühitdə sulu təbəqələrdə qazın saxlanması və yeraltı qaz anbarının yaradılması	62
Əliyeva X.E. Hidrodinamik təzyiqin təsiri altında süxurların dağılması proseslərinin öyrənilməsi	69

Kimya və neft-kimya texnologiyası

Cəfərov V.C., Mənzəfov M.Ə., Bektəşi N.R., Əlimirzəyeva N.Ə., Xəlilova S.M., Salahova S.Ə., Musayeva G.H. Müvafiq təbii minerallar əsasında kompozitlər və onların möhkəmlik dərəcəsinin müqayisəli təhlili	75
Məlikova İ.H., Əfəndi A.C., Aykan N.F., Fərəcov H.M., Yunisova F.Ə. Karbon monoksidin keçid metallarının oksidləri üzərində katalitik oksidləşməsi	82

İnformasiya texnologiyaları

Rəsulov S.R., Solod S.A., Yaqubov E.Z., Abdullayeva N.A. Sənaye təhlükəsizliyi idarəetmə sistemində intellektual qərar qəbulətmə sisteminin müəyyən edilməsi probleminin həlli	91
Ələkbərova T.Ş., Hacıyev R.M. Robocall hücumlarının təhlili: bu təhlükədən qorunma metodları	98
Səfərova A.A. Distillə kalonunun avtomatik idarəetmə sisteminin sintezi məsələsinin həlli	104
Abbasova P.Ə. Kiberfiziki sistemlərdə təhlükəsizliyin analizi və qiymətləndirilməsi	111
Məmmədova K.A., Əliyeva Ə.Ə. Z ədədli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin interpolyativ yanaşma mexanizmi əsasında modelləşdirilməsi	119

CONTENTS

Mechanics and Mechanical Engineering

Pashayev A.M., Asgarov K.A., Allahverdiyev K.R. Phase Transitions in Highly Anisotropic Ternary TlGaSe ₂ Crystals Studied by High-Resolution Optical Spectroscopy	7
Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Javadov M.Ya., Fidrovskaya N.N., Volchenko N.A., Voznyi A.V. Stress-Strain State of the Developed Single-Disc Shoe Brake of a Drilling Winch	15
Egorov A.G., Goyushov R.G., Abdullayev O.M. Analysis of Influence of the Cable Lay Equipment on the Main Dimensions of Subsea Construction Vessel	25
Huseynov A.G., Kerimov A.F. Study of the Camshaft Feed of an Internal Combustion Engine	35

Oil and Gas

Dadash-zade Kh.I., Makhmudova V.Z. Characteristic Features of the Movement of Elastic-Viscoplastic Fluid in Pipelines and Formations	47
Gurbanov A.N., Sardarova I.Z., Aliyev J.R., Nurmammadova-Huseynova S.B. Investigation of Gas Transportation in Main Pipelines	56
Aliyeva O.A., Aliyev A.S. Storage of Gas in Aquifers in Porous Media and Creation of Underground Gas Storage (UGS)	62
Aliyarova Kh.E. Study of the Processes of Destruction of Rocks under the Action of Hydrodynamic Pressure	69

Chemistry and Chemical Technology

Jafarov V.J., Manafov M.A., Bektashi N.R., Alimirzaeva N.A., Khalilova S.M., Salahova S.A., Musaeva G.H. Comparative Analysis of Composites Based on Corresponding Natural Minerals and their Strength	75
Malikova I.H., Efendi A.J., Aykan N.F., Farajov H.M., Yunisova F.A. Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metals Oxides	82

Information Technology

Rasulov S.R., Solod S.A., Yagubov E.Z., Abdullayeva N.A. Solving the Problem of Determining an Intelligent Decision-Making System in the Industrial Safety Management System	91
Alakbarova T.Sh., Hacıyev R.M. Analysis of Robocall Attacks: Methods of Protection Against This Threat	98
Safarova A.A. Solving the Problem of Synthesis of an Automatic Control System for a Distillation Column	104
Abbasova P.A. Analysis and Assessment of Security in Cyber-Physical Systems	111
Mammadova K.A., Alieva A.A. Modeling of Fuzzy Z-Number Control System Based on Interpolation Approach Mechanism	119

СОДЕРЖАНИЕ

Механика и машиностроение

Пашаев А.М., Аскеров К.А., Аллахвердиев К.Р. Фазовые переходы в сильно анизотропных тройных кристаллах $TlGaSe_2$, исследованные методом оптической спектроскопии высокого разрешения	7
Джанахмедов А.Х., Вольченко Д.А., Джавадов М.Я., Фидровская Н.Н., Вольченко Н.А., Возный А.В. Напряженно-деформируемое состояние разработанного однодискового колодочного тормоза буровой лебедки	15
Егоров А.Г., Геюшев Р.Г., Абдуллаев О.М. Анализ влияния кабелеукладочного оборудования на главные размерения судов обеспечения подводно-технических работ	25
Гусейнов А.Г., Керимов А.Ф. Изучение износа распределительного вала двигателя внутреннего сгорания	35

Нефть и газ

Дадашзаде Х.И., Махмудова В.З. Характерные особенности движения упруго-вязкопластичной жидкости в трубопроводах и пластах	47
Гурбанов А.Н., Сардарова И.З., Алиев Д.Р., Нурмамедова-Гусейнова С.Б. Исследование транспортировки газа по магистральным газопроводам	56
Алиева О.А., Алиев А.С. Хранение газа в водоносных горизонтах в пористых средах и создание подземных хранилищ газа (ПХГ)	62
Алиярова Х.Э. Исследование процессов разрушения горных пород под действием гидродинамического давления	69

Химия и нефтехимические технологии

Джафаров В.Дж., Манафов М.А., Бекташи Н.Р., Алимйрзаева Н.А., Халилова С.М., Салахова С.А., Мусаева Г.Г. Сравнительный анализ компози- тов на основе соответствующих природных минералов и степени их прочности	75
Меликова И.Г., Эфенди А.Д., Айкёан Н.Ф., Фараджев Г.М., Юнисова Ф.А. Каталитическое окисление оксида углерода над оксидами переходных металлов	82

Информационные технологии

Расулов С.Р., Солод С.А., Ягубов Е.З., Абдуллаева Н.А. Решение задачи определения интеллектуальной системы принятия решения в системе управления безопасностью труда промышленных производств	91
Алакбарова Т.Ш., Гаджиев Р.М. Анализ атак роботов-вызовов: методы защиты от угрозы	98
Сафарова А.А. Решение проблемы синтеза системы автоматического управления ректификационной колонной	104
Аббасова П.А. Анализ и оценка безопасности в киберфизических системах	111
Мамедова К.А., Алиева А.А. Моделирование нечеткой системы управления Z-числом на основе механизма интерполяционного подхода	119

UDC 550.8.08

DOI 10.52171/herald.279

Phase Transitions in Highly Anisotropic Ternary TlGaSe₂ Crystals Studied by High-Resolution Optical Spectroscopy

A.M. Pashayev, K.A. Asgarov, K.R. Allahverdiyev

Azerbaijan National Aviation Academy (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Kerim Allahverdiyev / e-mail: kerim.allahverdi@gmail.com

Abstract

The infrared and terahertz spectroscopy of TlGaSe₂ crystals has been studied over a wide temperature range (3 ÷ 325 K). The appearance of new phonon modes in the TlGaSe₂ spectra below a temperature of T = 120K was detected, due to a structural phase transition; the phonon parameters of the crystal under study revealed features at temperatures of 30K, 60K, and 92.5K. The observed anomalies have been explained as related to the reaction of phonons to the formation of an antisegnetoelectric structure and a change in the latter with temperature. Splitting of some phonon modes at 60K may occur due to symmetry breaking due to increased interaction between two polar sublattices.

Keywords: two-dimensional materials, layered semiconductors, lattice dynamics, phase transitions, ternary chalcogenides, phonons, infrared.

Submitted 6 March 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.M. Pashayev, K.A. Asgarov, K.R. Allahverdiyev

[Phase Transitions in Highly Anisotropic Ternary TlGaSe₂ Crystals Studied by High-Resolution Optical Spectroscopy]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 7-14

Yüksək çözünlüklü optik spektroskopiya ilə araşdırılan yüksək anizotrop üçlü TlGaSe₂ kristallarında faza keçidləri

A.M. Paşayev, K.A. Əsgərov, K.R. Allahverdiyev

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

TlGaSe₂ kristallarının infraqırmızı və terahertz spektroskopiya geniş temperatur aralığında (3 ÷ 325 K) tədqiq edilmişdir. TlGaSe₂ spektrlərində $T = 120$ K temperaturunun altındakı yeni fonon rejimlərinin meydana gəlməsi, struktur faza keçidinə görə aşkar edilmişdir; tədqiq olunan kristalın fonon parametrləri 30 K, 60 K və 92,5 K temperaturda xüsusiyyətləri aşkar etmişdir. 60 K-də bəzi fonon rejimlərinin parçalanması, iki qütb alt sandıq arasındakı qarşılıqlı əlaqənin artması ilə əlaqədar simmetriyanın pozulması səbəbindən baş verə bilər.

Açar sözlər: iki ölçülü materiallar, laylı yarımkəçiricilər, kristal qəfəs dinamikası, faza keçidləri, üçlü xalkogenidlər, fononlar, infraqırmızı radiasiya.

Фазовые переходы в сильно анизотропных тройных кристаллах TlGaSe₂, исследованные методом оптической спектроскопии высокого разрешения

A.M. Пашаев, К.А. Аскеров, К.Р. Аллахвердиев

Азербайджанская Национальная академия авиации (Баку, Азербайджан)

Аннотация

Исследована инфракрасная и терагерцовая (ТГц) спектроскопия кристаллов TlGaSe₂ в широком диапазоне температур (3 ÷ 325 K). Обнаружено появление новых фоновых мод в спектрах TlGaSe₂ ниже температуры $T = 120$ K, обусловленное структурным фазовым переходом; фоновые параметры исследуемого кристалла выявили особенности при температурах 30 K, 60 K и 92,5 K. Наблюдаемые аномалии были объяснены как связанные с реакцией фононов на формирование антисегнетоэлектрической структуры и изменением последней в зависимости от температуры. Расщепление некоторых фоновых мод при 60 K может происходить из-за нарушения симметрии из-за усиления взаимодействия между двумя полярными подрешетками.

Ключевые слова: двумерные материалы, слоистые полупроводники, динамика кристаллической решетки, фазовые переходы, тройные халькогениды, фононы, инфракрасное излучение.

Introduction

Two-dimensional ferroelectric TlGaSe_2 crystals have semiconductor, photoconductor, and photoelectric properties, which determines the variety of possibilities for their application in modern technologies, including active laser elements. At the temperature of liquid nitrogen and the application of an external electric field (~ 15 V), the photoelectric signal in this crystal increases significantly. For example, in the ultraviolet (UV) range of the spectrum, the signal increases by ~ 40 times, which opens up the prospects of using these crystals as UV detectors [1]. High photosensitivity also favors the creation of phototransistors [2]. High sensitivity to an external electric field makes it possible to use TlGaSe_2 as elements in microelectronics capable of changing their resistance depending on the electric charge flowing through it (memristors) and rectifiers [1, 2].

For various applications in ferroelectric memory elements, optoelectronics, and sensors, information about phase transitions in a crystal is important. The phase transition at a temperature of 100 K in TlGaSe_2 was first recorded by Raman, then information about the crystalline and ferroelectric states was refined by various methods, including measurements of dielectric properties, heat capacity, X-ray radiation, nuclear magnetic resonance (NMR), and others [3-5]. At temperatures $T = 120$ K and $T = 107$ K, two consecutive structural phase transitions occur. At $T_i = 107$ K, there is a transition of the first kind into the ferroelectric phase, accompanied by a fourfold increase in the unit cell. It is preceded by a transition of the second order at $T_i = 120$ K. In the temperature range of $107 \div 120$ K, an intermediate incommensurate state with a modulated wave vector $(\delta, \delta, 1/4)$, $\delta \approx$

0.02 is realized in units of the inverse lattice [6]. However, there is data on the modulation vector $(\delta, 0, 1/4)$, where $\delta = 0.04$ [7].

In addition to the well-known transitions at T_i and T_c , phase transitions at various temperatures have been discussed [8]. Several papers have suggested the coexistence of two competing polar sublattices in TlGaSe_2 [9, 10]. This is confirmed, in particular, by the study of the dielectric properties of a crystal in a static electric field. From this point of view, anomalies in the heat capacity curves could be interpreted both in the low-temperature phase ($T = 100$ K) and at high temperatures. In addition, based on dielectric measurements, the phase transition at $T^* = 65$ K was considered in the framework of a model of strongly interacting two polar sublattices. However, studies of the crystal structure and dynamics of the TlGaSe_2 crystal lattice at low temperatures are currently insufficient. The present work is aimed at eliminating this gap and contains a detailed study of the temperature dependence of TlGaSe_2 spectra, which can be used for analyses of the phase transitions.

In our work, crystals grown by the Bridgman method in evacuated quartz ampoules were used [3, 5]. To record the transmission spectra, thin plates on magnetic tape, oriented in the cleavage plane, with a thickness of up to $10 \mu\text{m}$, were used. Thus, all the presented spectra were recorded with the polarization of the incident radiation $E \perp c$ (previously, new lines at phase transition temperatures were recorded only in spectra with such polarization). The spectra were recorded on a Bruker IFS 125HR spectrometer (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) with a spectral resolution of 0.5 cm^{-1} in the spectral range of $10 \div 100 \text{ cm}^{-1}$ and 0.8 cm^{-1} in the range of $100 \div 400 \text{ cm}^{-1}$. The crystal was

cooled in a Sumitomo SRP096 closed-loop helium cryostat; the temperature range was $3 \div 325$ K. A helium-cooled bolometer was used as the signal sensor.

TlGaSe₂ crystals at room temperature have the space group C_{2h}^6 . The crystal structure is shown in Figure 1. GaSe₄ tetrahedra are combined into Ga₄Se₁₀ polyhedra, each polyhedron is connected to four neighboring ones through a common Se atom, forming a layer lying in the (001) plane. Each neighboring layer is rotated relative to the previous one by an angle of 90° (L1 and L2 in the Figure. 1).

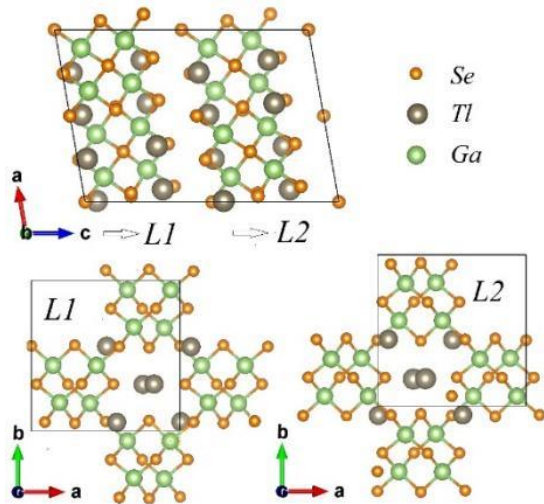


Figure 1 – The unit cell of the TlGaSe₂ crystal in the paraelectric state: a projection along the b- axis and two projections along the c- axis corresponding to two layers of combined Ga₄Se₁₀ polyhedra rotated relative to each other by an angle of 90°.

Tl atoms occupy the voids formed between the combined Ga₄Se₁₀ polyhedra. The unit cell contains two layers. The layer has tetragonal symmetry, but due to the displacement of each layer relative to the other by 0.25 (a + b) during the transition from one layer to another, tetragonal symmetry is broken, thus, the structure of the entire crystal is reduced to monoclinic. In real crystals,

displacement of Ga₄Se₁₀ polyhedra of neighboring layers is observed. At the same time, there is also a good cleavage parallel to the plane of the layer (001), and the Ga₄Se₁₀ polyhedra are not susceptible to splitting. The symmetry analysis of the C_{2h}^6 monoclinic cell leads us to the following mode distribution: $G = 23A_g + 25B_g + 23A_u + 25B_u$, of which 45 modes: $22A_u(z)$ and $23B_u(x,y)$ are IR-active.

It is difficult to analyze the symmetry of the real structure. In [11], instead of a real disordered crystal, a model crystal was considered in which neighboring layers were connected to each other using an inversion operation, which led to a D4h group for the entire cell. The mode distribution in this case has the form: $G = 7A_{1g} + 3A_{2g} + 8B_{1g} + 2B_{2g} + 14E_g + 2A_{1u} + 8A_{2u} + 3B_{1u} + 7B_{2u} + 14E_u$, of which $7A_{2u}(z) + 13E_u(x, y)$ oscillations are IR-active. Figure 2 shows the transmission spectra of a TlGaSe₂ crystal in the $10 \div 300$ cm⁻¹ spectral region.

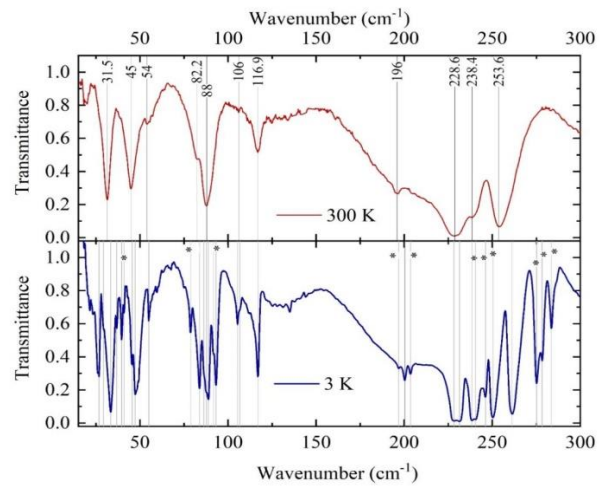


Figure 2 – Transmission spectra of TlGaSe₂ crystal at temperatures of 3 and 300 K. Asterisks mark new lines that appear at $T_i = 120$ K. The vertical lines indicate the frequencies of all recorded phonons (in particular, the components observed during phonon splitting at temperatures below 60 K). The labels above the vertical lines indicate the frequencies of the corresponding phonons at room temperature.

The spectrum recorded at room temperature is in agreement with the spectra given in the work [12]. At room temperature, 13 lines are observed in the spectrum, which corresponds to the results given in [11]. At a temperature of $T_i = 120$ K, new weak modes appear in the spectrum, the intensity of which gradually increases with a further decrease in temperature. A similar phenomenon occurs during phase transitions of the second kind. With a further decrease in temperature, some lines split. The detailed temperature dependence of the phonon spectra will be discussed below. The frequencies of all modes observed at temperatures $T = 300$ K, $T = 107$ K, and $T = 3$ K are shown in Table 1.

Phonons associated with translational oscillations of Tl ions and Ga₄Se₁₀ complexes are active in this range. The intense mode is observed at 31.5 cm⁻¹ at room temperature. Two new modes can be observed at temperatures $T < T_i = 120$ K: the weak mode 38.8 cm⁻¹ and the wide mode 23 cm⁻¹ (data are given for $T = 107$ K, as indicated in Table 1).

The weak mode splits at temperatures around 60 K (as can be seen from the inset of Figure 3 (a)), while the wide mode abnormally hardens as the temperature decreases. The intense mode of 31.5 cm⁻¹ also exhibits a temperature dependence: upon cooling, it narrows down to the temperatures of phase transitions, then begins to widen and acquires a complex contour (as seen in the left inset of Figure 3 (a)). The peculiarities of these two modes will be considered below.

The lowest frequency mode most likely refers to the so-called rigid layer modes or interlayer modes resulting from the addition of acoustic branches of the Brillouin zone in layered compounds.

Table 1 – Phonon mode frequencies (cm⁻¹) determined from reflection spectra at temperatures $T = 300$ K, $T = 107$ K, and $T = 3$ K. Index (a) indicates weak modes. New modes that appear in the spectra below the temperature $T_i = 120$ K are highlighted in bold. Index (b) indicates the components that are observed during splitting of respective phonons at temperatures below 60 K.

300 K	107 K	3 K
-	-	26.7
-	29.4 ^a	29.4 ^a
31.5	32.4	33.4 ^a 36.8 ^{a,b}
-	38.8	39.6 ^{a,b} 41 ^{a,b}
-	42 ^a	42 ^{a,b} 43 ^{a,b}
45	46.5 49 ^a	45.5 ^b 47.3 ^b 48.4 ^{a,b} 49.1 ^{a,b}
54 ^a	54.9	55
-	78.6	78.7
82.2	82.9	83.8
88	87.4	86.3 ^b 87.6 ^b 88.8 ^b
90.8 ^a	92.5	91.8 ^b 93.2 ^b
106	106 ^a	105.4 ^b 106.7 ^a
116.9	116.9	117
-	-	196.9 ^a
196	198.7	200.3
-	-	203.6 ^a
228.6	231.5	228.3 ^b 231.3 ^b
-	239	238.4 ^b 240.5 ^b
238.4	-	-
-	245	246.1
-	250.7	250.5
253.6	258.5	261.2
-	274.3	275.1 ^b 278.3 ^b
-	282.1	283.6 ^b 286.6 ^b

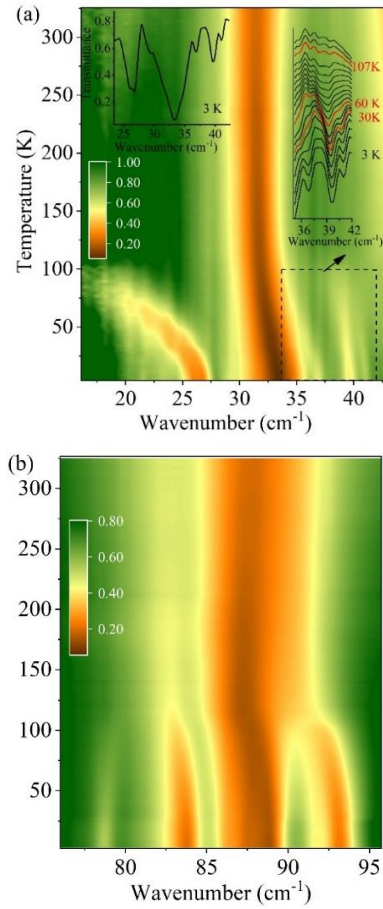


Figure 3 – Intensity maps of the TlGaSe₂ crystal transmission spectra in the ranges 15 ÷ 45 cm⁻¹ (a), 75 ÷ 95 cm⁻¹ (b) at temperatures of 3 ÷ 300 K. The left inset of Figure (a) shows the transmission spectrum at a temperature of 3 K. The right-hand inset of Figure (a) shows the transmission spectra in the dotted area of the intensity map.

Such modes are characterized by a strong and anomalous nonmonotonic temperature dependence of the parameters, which is sensitive to ferroelectric and magnetic states.

In the process of studying the temperature dependence of the ferroelectric soft mode by submillimeter dielectric spectroscopy, the splitting of the soft mode into two components have been considered [13]. The first, longer-wavelength component exhibits the behavior of the classical ferroelectric soft mode. The square of its frequency decreases linearly with decreasing

temperature, approaching zero as it approaches the phase transition point. The shorter wavelength component behaves nonmonotonously: as the temperature decreases, its frequency first decreases, then increases and continues to increase as it approaches T_i . In the present experiment, the choice of spectral region was limited by the capabilities of the beam splitter: at frequencies nearly about 15 cm⁻¹, the spectra were noisy, and the region < 15 cm⁻¹ was inaccessible.

No measurements of the split component in the ferroelectric phase were carried out. Thus, we do not have a complete picture, however, it is likely that we observed the same mode, but in a different temperature range. The simulation of the dispersion of the acoustic branch, measured by the method of inelastic neutron scattering in the [001] direction in the paraelectric phase, allowed us to estimate the frequency of the rigid layer mode at 15 cm⁻¹ (observed also in combinational light scattering spectra) for the case of two layers in a unit cell. This corresponds to the high-frequency component. Figure 3 (b) shows a map of transmission spectrum intensities in the range of 75 ÷ 95 cm⁻¹ at the temperature 320 K.

The corresponding spectra in a narrower temperature range of 3 ÷ 165 K are shown in Figure 4 (a). At room temperature, there is an intense mode of about 90 cm⁻¹ and an overdamping mode of 82 cm⁻¹, which narrows strongly and increases in intensity below T_i . The new mode appears at 78 cm⁻¹ at temperatures below T_i , and when cooled, its intensity increases smoothly, but the frequency does not change.

The intense mode around 90 cm⁻¹ consists of two components with peaks at 88 cm⁻¹ and 90.8 cm⁻¹.

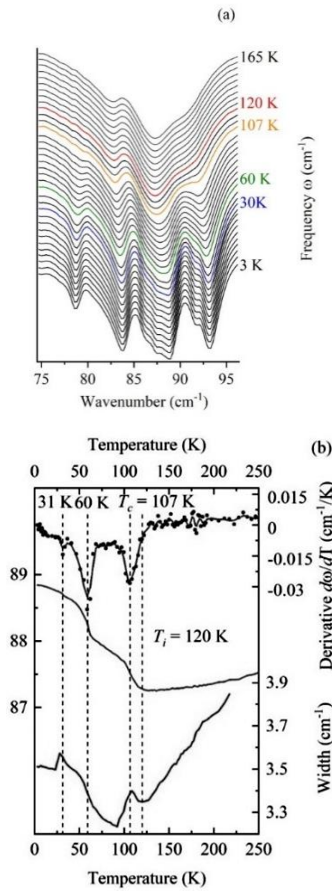


Figure 4 – The transmission spectra of the TlGaSe₂ crystal in the range 75 ÷ 95 cm⁻¹ (a). The spectra at $T_i = 120$ K, $T_c = 107$ K, as well as the spectra at $T^* = 60$ K and $T = 30$ K, at which features in the dependences of the parameters of the most intense mode in this range are observed, are shown in different colors.

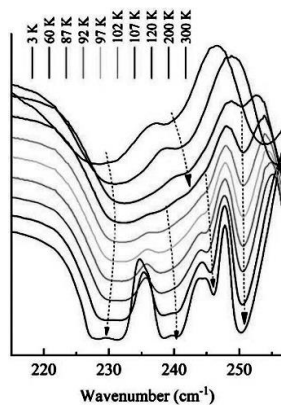


Figure 5 – TlGaSe₂ transmission spectra in the temperature range of 3 ÷ 300 K, in the frequency range of 215 ÷ 255 cm⁻¹. The arrows are shown for clarity

The highest frequency component of overdamping at room temperature narrows strongly at $T < T_i = 120$ K and abruptly shifts to a higher frequency region. This is most likely directly related to the interlayer ordering and the increase in the corresponding force constants. Upon further cooling, the mode shows practically no temperature dependence (Figure 4b).

Figure 5 shows the transmission spectra of a TlGaSe₂ crystal in the temperature range of 3 ÷ 300 K in the frequency range of 215 ÷ 255 cm⁻¹. The main contribution to the spectrum in this range is made by internal vibration of Ga₄Se₁₀ complexes.

At room temperature, two modes with frequencies of about 230 and 240 cm⁻¹ are observed. As the temperature decreases, as it approaches $T_i = 120$ K, the modes expand and spread out, and at $T_c = 107$ K they merge into one wide band, on which about four weaker peaks can be distinguished. In addition, at $T_i = 120$ K, a line of about 250 cm⁻¹ appears. Below $T_c = 107$ K, the wide band smoothly splits into three peaks with frequencies around 230, 240, and 245 cm⁻¹. Below $T^* = 60$ K, each of the peaks at 230 and 240 cm⁻¹ is partially splits into two components. The most noticeable difference between the temperature behavior of these modes and the temperature regime of the band at 88 cm⁻¹ is the broadening of the bands at $T > T_i = 120$ K (the 88 cm⁻¹ line begins to widen only below the transition point to i).

Conclusion

Detailed temperature studies of the IR transmission spectra of a TlGaSe₂ crystal with incident light polarization $E \perp c$ was carried out. Data processing, which included the construction of temperature dependences of

phonon mode parameters, made it possible to identify a number of phase transitions. In addition to the well-known phase transitions at $T_i = 120$ K and $T_c = 107$ K, we recorded a number of anomalies at $T = 93$ K, $T^* = 60$ K and $T = 30$ K. The first feature is probably related to the transition of the crystal to a peculiar antiferroelectric state, which was discussed earlier in [9,10]. Below $T^* = 60$ K, we detected splitting of some lines in the spectrum, which is most likely a sign of a

decrease in symmetry due to a change in the interaction of two polar sublattices in TiGaSe_2 . Further calorimetric, dielectric, and X-ray studies of the crystal are needed to determine the nature of the anomaly at a temperature of 30 K.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. Seyidov M.Y., Suleymanov R.A., Balaban E., Şale Y. Enhancing the Photoresponse of a TiGaSe_2 Semiconductor for Ultraviolet Detection Applications. *Phys. Scr.* 2015, 90, 015805.
2. Yang S., Wu M., Wang H., Cai H.; Huang L., Jiang C., Tongay S. Ultrathin Ternary Semiconductor TiGaSe_2 Phototransistors with Broad-Spectral Response. *2D Mater.* 2017, 4, 035021.
3. Abdullaev G.B., Allahverdiyev K.P., Burlakov V.M., Vinogradov E.A., Zhizhin G.N., Melnik N.N., Salaev E.Ju., Sardardy P.M. Issledovanie Spektrov Kolebanij Kristallicheskoj Reshgotki TiGaSe_2 Vblizi Tochki Fazovogo Perehoda. *Doklady AN Azerb. SSR* 1979, 35, 30–34.
4. Kashida S., Kobayashi Y. Neutron Scattering Study of the Structural Phase Transitions in TiGaS_2 . *Journal-Korean Physical Society* 1998, 32, 40–43.
5. Allahverdiyev K.R., Akhmed-zade N.D., Mamedov T.G., Mamedov T.S., Seidov M.-G.Yu. Behavior of the Layered Crystals TlInS_2 and TiGaSe_2 near Phase Transitions in a Static Electric Field. *Low Temperature Physics* 2000, 26, 56–61.
6. McMorro D.F., Cowley, R.A., Hatton P.D., Banys J. The Structure of the Paraelectric and Incommensurate Phases of TiGaSe_2 . *J. Phys.: Condens. Matter* 1990, 2, 3699-3712.
7. Kashida S., Kobayashi Y. Neutron Scattering Study of the Structural Phase Transitions in TiGaS_2 . *Journal-Korean Physical Society* 1998, 32, 40-43.
8. Panich A.M. Electronic Properties and Phase Transitions in Low-Dimensional Semiconductors. *J. Phys.: Condens. Matter* 2008, 20, 293202.
9. Mikailov F.A., Başaran E., Şentürk E., Tümbek L., Mammadov T.G., Aliev V.P. Time Relaxation of Dielectric Constant in the Commensurate Phase of TiGaSe_2 . *Solid State Communications* 2004, 129, 761-764.
10. Mikailov F.A., Başaran E., Şentürk E., Tümbek L., Mammadov T.G., Aliev V.P. Phase Transitions and Metastable States in TiGaSe_2 . *Phase Transitions* 2003, 76, 1057-1064.
11. Gasanly N.M., Goncharov A.F., Melnik N.N., Ragimov A.S., Tagirov V.I. Optical Phonons and Structure of TiGaS_2 , TiGaSe_2 , and TlInS_2 Layer Single Crystals. *Physica Status Solidi*. 1983, 116, 427–443.
12. Hochheimer H.D., Gmelin E., Bauhofer W., Von Schnering-Schwarz Ch., Von Schnering H.G., Ihringer J., Appel W. Study of the Ferroelectric Phase Transition of TiGaSe_2 by Dielectric, Calorimetric, Infrared and X-Ray Diffraction Measurements. *Z. Physik B - Condensed Matter* 1988, 73, 257–263.
13. Pashayev A.M., Veliev N.A., Askerov K.A., Musaev A.A., Mamedov I.H., Allahverdiyev K.R., Madzhidova V.G. Otlichitelnye osobennosti IK-spektrov syroj nefti Absheronskogo poluostrova. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2024, vol. 16 (4), pp. 34-39.

UDC 621.891.001.57

DOI 10.52171/herald.285

Stress-Strain State of the Developed Single-Disc Shoe Brake of a Drilling Winch

**A.Kh. Janahmadov¹, D.A. Volchenko², M.Ya. Javadov³, N.N. Fidrovskaya⁴,
N.A. Volchenko⁵, A.V. Vozniy⁴**

¹ *Azerbaijan National Aviation Academy (Baku, Azerbaijan)*

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

³ *Azerbaijan Engineering Academy (Baku, Azerbaijan)*

⁴ *Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)*

⁵ *Kuban State Technological University (Krasnodar, Russia)*

For correspondence:

Andrey Vozniy / e-mail: andrii.voznyi@gmail.com

Abstract

Theoretical and experimental studies of forced air-nano-liquid cooling of a single-disc shoe brake of a drilling winch have made it possible to establish the following. Improvement of wear-friction properties of friction pairs is achieved due to operation in the temperature range below the permissible ones for friction lining materials and, as a consequence, braking qualities for the lifting shaft of a drilling rig. Application of low-melting metal nanopowders of various modifications diluted with water or acetone for the liquid, which allows to significantly increase the thermal conductivity coefficient of the nanoliquid and thereby improve the efficiency of forced cooling of the friction belts of the brake half-disks. The volumes of nanoliquid in the evaporation zones are much smaller than in the zones of its transport, which intensifies heat exchange in various aggregate states of the nanoliquid due to increased cycles of its circulation. The forced air heat exchange of matte and polished surfaces of the disk by convection and radiation, as well as thermal conductivity, spent on heating the friction belts of the disk, is taken into account, which allows determining a smaller part of the heat removed from their surfaces during braking. Accelerators of the motion of nanofluid in any aggregate state between the zones of evaporation and transport-condensation in their heated state are diffusers, and retarders are the nanostructure of the condensation and transport zone of the disk, which cause a change in the gradients of velocity, pressure and temperature in the layers of nanofluid. With a variable thickness of the friction belt of the disk and the specifics of cooling on the effect of a "heat pipe" using the method of finite element modeling, estimate the stress-strain state of the disk wall.

Keywords: drilling winch, disc-shoe brake, friction unit, brake disc, nanofluid, stress-strain state.

Submitted 5 June 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.Kh. Janahmadov et al.

[Stress-Strain State of the Developed Single-Disc Shoe Brake of a Drilling Winch]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 15-24

Qazıma bucurqadının bir diskli kündəli əyləcinin gərginlik-deformasiya vəziyyəti

Ə.X. Cənəhmədov¹, D.A. Volçenko², M.Y. Cavadov³, N.N. Fidrovskaya⁴, N.A. Volçenko⁵, A.V. Vozniy⁴

¹Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Bakı, Azərbaycan); ²İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (İvano-Frankivsk, Ukrayna); ³Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Bakı, Azərbaycan); ⁴Xarkov Milli Avtomobil və Yol Universiteti (Xarkov, Ukrayna); ⁵Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Krasnodar, Rusiya)

Xülasə

Məqalədə qazıma bucurqadının bir diskli kündəli əyləcinin məcburi hava-nanomaye ilə soyudulmasının tədqiqinin nəticələri təqdim olunub. Sürtünmə cütlərinin yeyilmə-sürtünmə xassələrinin təkmilləşdirilməsi friksion kündə materialları üçün buraxıla bilən temperaturdan aşağı temperatur diapazonunda istismar nəticəsində əldə edilmiş və nəticədə, qazıma qurğusunun qaldırıcı valının əyləc keyfiyyətlərinə nail olunub. Mayelər üçün su və ya aseton ilə həll olunmuş müxtəlif modifikasiyalı asan əriyən metalların nanotozlarının istifadəsi nanomayenin istilik keçiricilik əmsalını əhəmiyyətli dərəcədə artırmağa imkan verir və bununla da əyləc yarım disklərinin sürtünmə kəmərlərinin məcburi soyudulmasının səmərəliliyini yaxşılaşdırır (artırır). Diskin parlaq və cilalanmış səthlərinin konveksiya və radiasiya ilə məcburi hava istilik mübadiləsi, həmçinin disk sirtünmə kəmərlərini qızdırmaq üçün istifadə olunan istilik keçiriciliyi nəzərə alınb ki, bu da əyləc zamanı onların səthlərindən çıxarılan istiliyin daha kiçik bir hissəsini təyin etməyə imkan verir. İstənilən aqreqasiya vəziyyətində nanomayenin hərəkət sürətləndiriciləri buxarlanma və nəqliyyat-kondensasiya zonaları arasında onların qızdırıldığı zaman diffuzorlar, gecikdiriciləri isə - kondensasiya zonasının nanostrukturunu və disk sirtünmə kəmərinin dəyişkən qalınlığı və "istilik borusu" effektinə əsaslanan soyutma xüsusiyyətləri ilə sonlu elementlərin modelləşdirilməsi metodu ilə disk divarının gərginlik-deformasiya vəziyyəti qiymətləndirilib.

Açar sözlər: qazıma bucurqadı, diskli-kündəli əyləc, friksion düyün, əyləc disk, nanomaye, gərginlik-deformasiya vəziyyəti.

Напряженно-деформируемое состояние разработанного однодискового колодочного тормоза буровой лебедки

А.Х. Джанахмедов¹, Д.А. Вольченко², М.Й. Джавадов³, Н.Н. Фидровская⁴, Н.А. Вольченко⁵, А.В. Возный⁴

¹Азербайджанская Национальная академия авиации (Баку, Азербайджан); ²Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (Ивано-Франковск, Украина); ³Азербайджанская Инженерная академия (Баку, Азербайджан); ⁴Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина); ⁵Кубанский национальный технологический университет (Краснодар, Россия)

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования принудительного воздушно-наножидкостного охлаждения однодискового колодочного тормоза буровой лебедки. Улучшение износо-фрикционных свойств пар трения достигается за счет эксплуатации в интервале температур ниже допустимых для материалов фрикционных накладок и, как следствие, тормозных качеств для подъемного вала буровой установки. Применение для жидкости нанопорошков легкоплавких металлов различных модификаций, разбавленных водой или ацетоном, позволяет значительно увеличить коэффициент теплопроводности наножидкости и тем самым улучшить эффективность принудительного охлаждения поясов трения полудисков тормоза. Учтен вынужденный воздушный теплообмен матовых и полированных поверхностей диска конвекцией и радиацией, а также теплопроводностью, идущей на нагревание поясов трения диска, что позволяет определить меньшую часть теплоты, отведенную от их поверхностей при торможениях. Ускорителями движения наножидкости в любом агрегатном состоянии между зонами испарений и транспорта-конденсации при их нагретом состоянии являются диффузоры, а замедлителями – наноструктура зоны конденсации и транспорта диска. При переменной толщине пояса трения диска и специфики охлаждения на эффекте «тепловой трубы» с помощью метода конечно-элементного моделирования оценено напряженно-деформированное состояние стенки диска.

Ключевые слова: буровая лебедка, дисково-колодочный тормоз, фрикционный узел, тормозной диск, наножидкость, напряженно-деформированное состояние.

Introduction

In the oil and gas industry, disc-shoe brakes are increasingly used. One of the reasons for the downtime of well drilling rigs is associated with the intensity of wear of friction pairs of the friction units of the brakes of drilling rigs. This occurs due to insufficient cooling of the disks. A particularly complex, urgent and important problem is the study and research of heat exchange in modern brake engineering for winches of drilling rigs. At high speeds of lowering the drill string into the well, the heat transfer conditions in the friction zone of the disc-shoe brake change significantly due to the insufficient efficiency of forced air cooling, depending on the speed of rotation of the brake disc washed by air flows. In this case, the issue of the need for forced air-nano-liquid (a mixture of the finest metal powder and liquid), located in the chamber of a new type of disc, is of significant importance. Therefore, studies devoted to the development of a method for reducing the thermal loads of friction pairs of disc-shoe brakes, as a result of which their operating parameters change, are relevant.

In the work [1] a comparison of foreign models of disc-shoe brakes with hydraulic drive PS440-9000 and PS40-900 of drilling rigs ZJ12 and ZJ15 was made. As a result, it was found that in order to increase the braking torque by 11 times, the diameter of the brake disc was increased by 1.7 times. The number of brake units was increased from 2 to 7, during sharp braking from 1 to 3, and the pressure in the hydraulic system increased from 7.0 to 8.0 MPa [2]. At the same time, the friction power arising from the frictional interaction of friction pairs was not considered, taking into account their heating and forced air-nano-liquid cooling, which

makes the study no more complete. This approach is shown in the work [3], according to the results of which it was proved that the thickness of the brake disc has an uneven effect on the gradients of surface-volume temperatures and equivalent stresses [4] that occur during electro thermomechanical friction, washing microcracks on the friction belt of a serial disc. However, it was not noted that the main design parameter of the brake disc is its thickness, which affects the weight, and therefore, the target function during optimal design, and the control parameters are the thickness of the disc, which complicates subsequent studies. This could be reflected in the work [5], where, based on the systems approach, the possibility of forming equivalent series of friction pairs of a modular disc-shoe brake of mine hoisting machines with different lifting capacities was shown. According to their power parameters, brake friction pairs were used in them, which were tested and studied on vehicles as a dynamic model [6]. But the tests were carried out without taking into account the complex power factors of forced cooling and heat transfer, which are important parameters in the heat exchange of friction pairs. And in the work [7] the curves of formation of the total time costs under different operating modes of friction pairs of band-shoe brakes of a drilling winch without inclusion of an additional hydraulic brake are presented. In this case the energy loading of friction pairs of brakes during drilling at a depth of 2900 m was not taken into account. At such a drilling depth it is necessary to include a hydraulic brake [8]. But the factor was not taken into account that during drilling with disk-shoe brakes there is no need to use a hydraulic brake, since they have sufficient energy capacity and efficiency. In the work [9]

a combination of mathematical models in tribonics with a physical experiment and operational experience was used. This made it possible to combine the calculation and theoretical studies with the experimental ones by developing the theory of thermal similarity and the method of generalizing the variable dimensionless parameters for friction pairs [10]. However, nothing was said about the generalization of the variable dimensional design and operational parameters of friction pairs.

All this gives grounds to assert that it is advisable to conduct research devoted to the development of new disc-shoe brakes for drilling winches.

The purpose and objectives of the work

The aim of the work is to develop a new disc-shoe brake for drilling winches. This will improve the braking qualities for the lifting shaft of the drilling rig.

To achieve the set goals, the following tasks were solved: create a new design of a disc-shoe brake for a drilling winch; to evaluate the stress-strain state of a variable disk wall thickness using a finite element modeling method.

Design and operation of the developed single-disc shoe brake for a drilling winch

Let us consider the design features and operation of a serial disc-shoe brake, forcedly cooled by air flows. Figure 1 *a*, *b* shows a serial drilling winch with disc-shoe brakes, cooled by air flows of the medium (*a*) and disc-shoe brakes with a hydraulic drive (*b*). The serial drilling winch 1 consists of a pair of disc-shoe brakes 2, having brake discs with friction belts 3, which cover supports 4 with friction linings 5 on a metal substrate and ring

holders 6, installed by spring devices 7 and hydraulic drives 8. The disc-shoe brake with forced air cooling operates during lowering and lifting operations of the drill pipe column depending on its weight in aperiodic cyclic and long-term braking modes. Disc-shoe brakes 2 are installed on both sides of the drum 1 of the drilling winch.

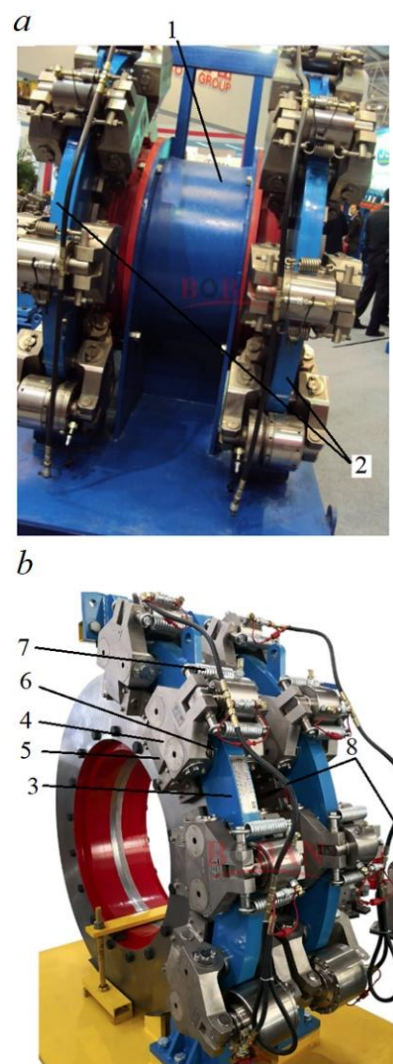


Figure 1 a, b – Serial drilling winch with disc-shoe brakes cooled by air flows of the medium (*a*) and disc-shoe brakes with hydraulic drive (*b*): 1 - drilling winch; 2, 3 - brakes with friction belts; 4, 5, 6 - supports with friction linings on a metal substrate and ring holders; 7, 8 - spring devices with hydraulic drives

They have solid metal disks 3, on the friction belts of which there are supports 4, having tong holders 5 of double action, which are friction linings 5 on metal substrates. Spring devices 7 for switching on and off the supports 4 are located on top. In this case, the supports 4 have individual hydraulic drives 8.

When braking, a large amount of heat is generated in the mating surfaces of the brake discs, which cannot be further removed into the environment from the matte and polished surfaces of the brake discs.

The present system is proposed to intensify forced air-nano-liquid cooling of friction pairs of the disc-shoe brake of a drilling winch. Figure 2 shows fragments of a single-disc shoe brake with a forced air-nano-liquid cooling system. The single-disc shoe brake of the drilling winch has design features and operates as follows.

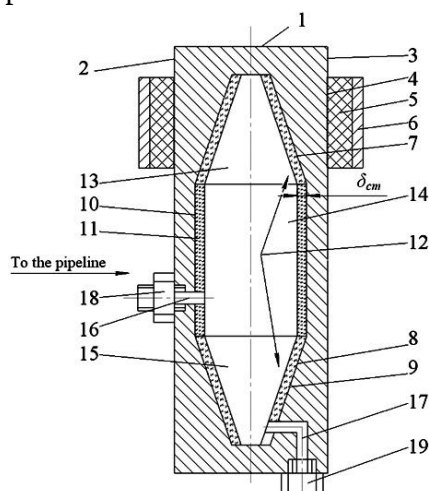


Figure 2 – Schematic representation of a single-chamber disc-shoe brake of a drilling winch with a system and method of forced air-nano-liquid cooling: 1, 2 and 3 brake disc with left and right halves; 4 - friction belt; 5, 6 - friction lining with a metal substrate; 7, 8 and 9 - upper and lower diffusers and their internal surfaces; 1 - modifications of capillary structures; 12 - common chamber; 13, 14 and 15 - zones: two evaporations, combined transport and condensation; 16, 17 - openings-channels; 18, 19 - inlet and outlet valves

The brake disk 1 consists of two half-disks 2 and 3 of variable thickness, the largest of which corresponds to the maximum radius of the location of the end of the lining 5 on the friction belt 4 of the half-disk 3, and the smallest of the thicknesses - to the minimum radius, and at the same time, with their internal shape, the half-disks 2 and 3 with a variable thickness according to a linear law form diffusers 7 and 8 in the upper and lower parts of the disk 1. Such a design solution allows two diffusers 7 and 8 to be accelerators of heat removal from the evaporation zones 13 to the combined transport zone 14 and condensation 15 at any aggregate state of the nanofluid. This occurs due to: firstly, an insignificant change in the gradient of the bulk temperature on the friction belt 4 of the right half-disk 3 and a decrease in the braking torque along the diameter of the disk 1; secondly, a significant difference in the heat exchange areas of the evaporation zones 13 and transport 14, as well as condensation 15; thirdly, a difference in the sizes of the particles of the capillary structure in the interaction zones. With extremely strong heat generation on the friction surface of the disc 1 in the brakes, the usual liquid in the chamber of its volume can almost instantly turn into steam, which will cause an explosion in it. A figurative example - as much heat is released as is needed to evaporate 6 gallons of water (27.0 l) per minute. Low-melting metals are used as heat carriers in the chamber 12 of the disc 1 in the cooling system Na ($t_p = 97,79^\circ\text{C}$) и Li ($t_p = 180,5^\circ\text{C}$) in the form of powders mixed with water, which are called nanofluids. The latter are used depending on the energy load of the friction pairs of the disc-shoe brakes of drilling winches. For disc 1 of the brake, lithium powder (Li) in nanofluid (50%

lithium powder and 50% water) is used, which is capable of removing significant heat flows (about 15.0 kW/cm^2 at a surface-volume temperature of friction pairs of 800°C). The cooling system is filled through the opening of the channel 16 closed by the inlet valve 18 (Fig. 2) by $\frac{3}{4}$ of the volume of the chamber 12 of the disc 1. The outlet valve 19 serves to bleed the nanofluid. In addition, the nanofluid itself is not shown in the cooling system due to its state of aggregation.

The driving force in the processes of heating and cooling the friction belts of the brake disc are the temperature gradients of the layers of nanofluid, which take place in the zones of evaporation 13, condensation 15 and transport 14 (diffusers 7 and 8), located in the volume of chamber 12. When the disc 1 rotates, the centrifugal force drives the nanofluid to the inner walls of its chamber 12. The retarder of the stay of the nanofluid in the evaporation zone 13 is the modified capillary structure 11.

The method of forced air-nano-liquid cooling of friction pairs of a single-disc shoe brake of a drilling winch consists in the fact that the surfaces of diffusers 7 and 8 are covered with small particles of a capillary structure and are zones of evaporation 13, and zones of transport 14 and condensation 15 are large particles, and the external system of forced forced cooling of matte and polished surfaces of a rotating disk 1 is subject to convective and radiation heat exchange, washed by flows of the medium.

Finite element modeling of a single-disc shoe brake of a drilling winch

To study mechanical and thermal stresses, the finite element modeling method was used using the Ansys Workbench

program, which considered the friction unit "disk-linings" with the following initial design and operational parameters: brake disc material - SCh 25, specific load on friction raceways $p = 7,0 \text{ MPa}$, friction lining material FK-24A, permissible temperature of lining materials 390°C . In the thermal calculation, the surface-volume temperature was set at $t_p = 390^\circ \text{C}$, the ambient temperature was $t_0 = 22^\circ \text{C}$. The coefficients of convection heat transfer from the outer surface to the washing environment were $\alpha_{in} = 27,0 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$. As for the inner surface of the disk, the heat transfer coefficients from the inner surface of the disk and the surface of the diffuser into the washing nanofluid were $\alpha_{out} = 60,0 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ and $\alpha_d = 90,0 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, respectively. Figure 3 *a, b, c* shows the finite element mesh of the disk model (*a*), the schemes of its thermal (*b*) and mechanical load (*c*).

In the simulation, a single-disc shoe brake of a drilling winch with the following disk thickness b was considered: 100.0 mm; 120.0 mm and 140.0 mm. The results of finite element simulation of equivalent stresses and their gradients are presented in Table.

Figure 4 *a, b, c* shows the results of modeling the temperature stresses of a single-disc shoe brake with different disc thicknesses: *a*– $b=100,0 \text{ mm}$; *b*– $b = 120,0 \text{ mm}$; *c*– $b = 140,0 \text{ mm}$.

When analyzing the data in table 1 and (Fig. 4 *a, b, c*) we note the following: the greatest mechanical stresses were observed in zone II above the diffuser. They arise as a result of the action of pulsed specific loads on the friction belt of the disk, which lead to compression of the disk and deformation in the thinnest place - above the diffuser (see Fig. 4); there is also zone III with high mechanical stresses, also arising from the action of pulsed

specific loads on the friction belt of the disk with a small thickness of its wall; with an increase in the disk thickness from 100,0 mm to 120,0 mm, with an increase in the thickness of its wall from 15,0 mm to 25,0 mm, the mechanical stresses in zone II decreased from 1154,2 MPa to 1029,6 MPa, i.e. by 10,8%. But with an increase in the disk thickness from 120,0 mm to 140,0 mm, an increase in mechanical stresses by 15,3% was observed in zone III; with an increase in the disk thickness by 1,4 times, the mechanical stress gradients decreased from 46,9 MPa/mm to 35,1 MPa, i.e. by 25,2%, which has a positive effect on resistance to crack formation in zone II.

When analyzing the data in table 1 and (Fig. 5 a, b, c) we indicate the following: the highest temperature stresses were observed in zone I at the minimum radius of the disk friction belt. They arise due to the action thermal load of the mating surface in places of the smallest thickness of the disk wall, which is deformed due to its intense heating and braking torque; with an increase in the thickness of the disk by 1,4 times, i.e. its wall by 2,14 times, the temperature stresses decreased from 246,2 MPa to 186,2 MPa, i.e. by 24,4%; with an increase in the disk thickness by 1.4 times, the temperature stress gradient decreased from 5,94 MPa/mm to 2,09 MPa/mm, i.e. by 64,8%, which has a positive effect on the resistance to crack formation in zone I of the wall.

When analyzing the data in table 1 and (Fig. 6 a, b, c) the following should be noted: the pattern of total equivalent stresses has clearly defined zones I and II, which are the result of the action of temperature and mechanical loads on the friction belt of the disk.

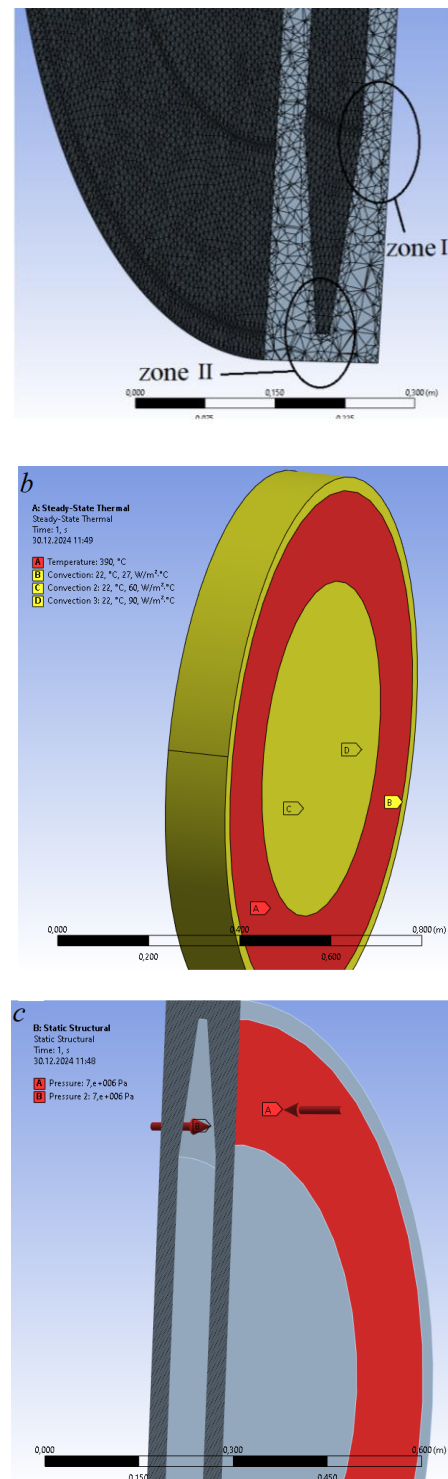


Figure 3 a, b, c – Finite element mesh of the disk model (a), thermal (b) and mechanical load (c) diagrams of a single-disk shoe brake of a drilling winch

Table – Results of finite element modeling of equivalent stresses and their gradients in a single-disc shoe brake of a drilling winch

D , mm	b , mm	δ_{st} , mm	m_d , kg	Maximum equivalent stresses in the disk, MPa				Stress gradients across the disk thickness, MPa/mm		
				temperature in zone I	mechanical in zone II	total in zone I	total in zone II	temperature in zone I	mechanical in zone II	total in zone I
1200	100, 0	15, 0	433, 3	246,2	1154,2	278, 0	1209, 7	5,94	46,9	9,26
	120, 0	25, 0	596, 1	208,3	1029,6	242, 7	1074, 4	2,98	38,5	4,22
	140, 0	35, 0	758, 9	186,2	1215,4	221, 4	1256, 2	2,09	35,1	2,71

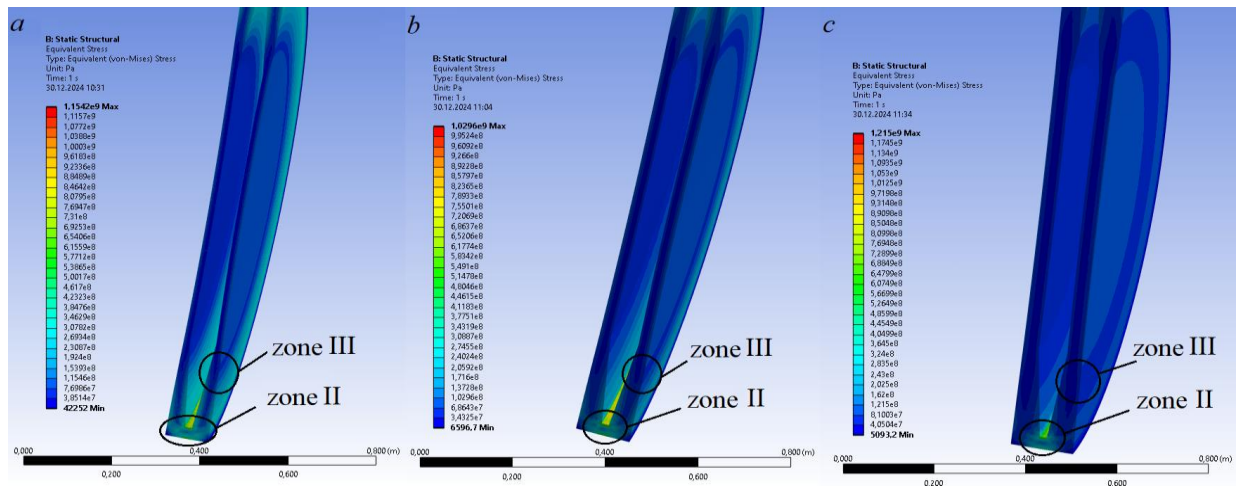


Figure 4 a, b, c – Results of modeling mechanical stresses in a single-disc shoe brake with different disc thicknesses: a – $b=100,0$ mm; b – $b=120,0$ mm; c – $b=140,0$ mm

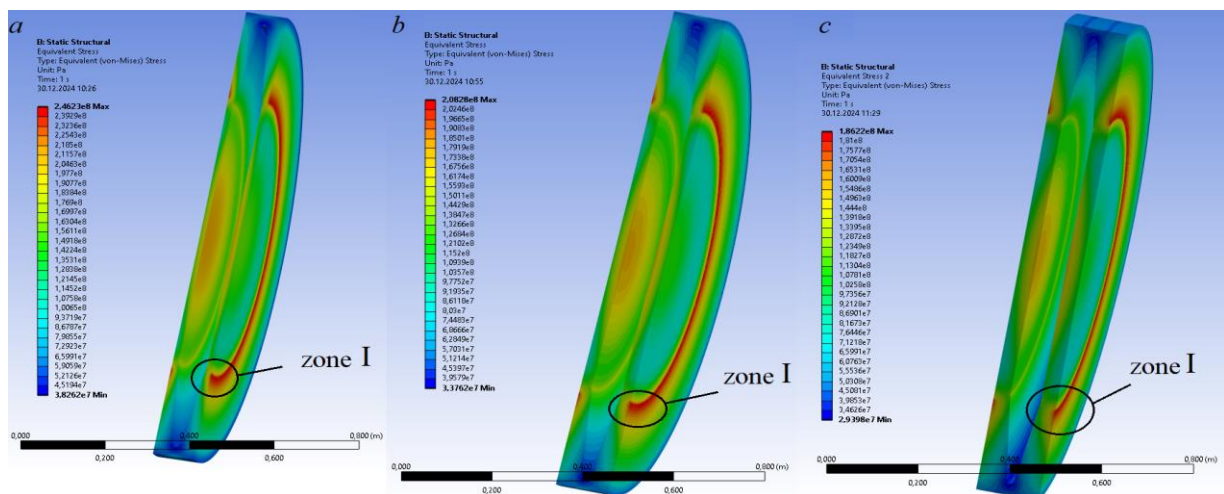


Figure 5 a, b, c – Results of modeling the temperature equivalent stresses in a single-disc shoe brake with different disc thicknesses: a – $b=100,0$ mm; b – $b=120,0$ mm; c – $b=140,0$ mm

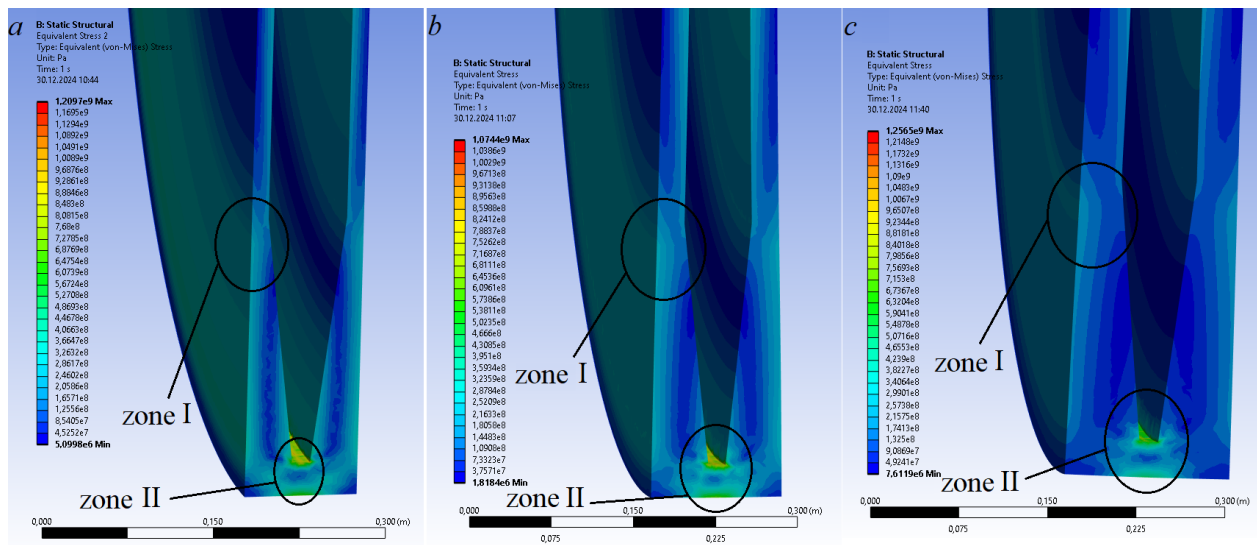


Figure 6 a, b, c – Results of modeling the total equivalent stresses in a single-disc shoe brake with different disc thicknesses: *a* – *b*=100,0 mm; *b* – *b* = 120,0 mm; *c* – *b*=140,0 mm

It has been established that with an increase in the thickness of the disk, the total equivalent stresses on the surface of its friction belt decrease, the surface and thickness gradients also decrease; with an increase in the disk thickness by 1,4 times and the thickness of its wall by 2,14 times, the total stress equivalents in zone I decreased from 278,0 MPa to 221,4 MPa, i.e. by 25,6%. In zone II of the disk, they first decreased from 1154,2 MPa to 1029,6 MPa, and then increased to 1215,4 MPa; temperature stress gradients decreased from 9,26 MPa/mm to 2,71 MPa/mm, i.e. by 241%, which contributes to resistance to cracking.

Thus, the intensification of heat removal cycles “evaporation zone – transport zone – condensation zone” of nanofluid in any aggregate state in the volume of the disk chamber allows to increase the braking efficiency of the disk-shoe brakes of the drilling winch when lowering the drill pipe column into the well.

Theoretical and experimental studies of forced air-nano-liquid cooling of a single-disc

shoe brake of a drilling winch allowed us to establish the following: an improvement in the wear and friction properties of friction pairs is achieved due to operation in a temperature range below that permissible for friction lining materials and, as a consequence, the braking qualities for the lifting shaft of the drilling rig; an improvement in the wear and friction properties of friction pairs is achieved due to operation in a temperature range below that permissible for friction lining materials and, as a consequence, the braking qualities for the lifting shaft of the drilling rig; the use of low-melting metal nanopowders of various modifications diluted with water or acetone for the liquid, which allows for a significant increase in the thermal conductivity coefficient of the nanofluid and thereby improves the efficiency of forced cooling of the friction belts of the brake half-discs; the volumes of nanofluid in the evaporation zones are much smaller than in the zones of its transport, which intensifies heat exchange in different aggregate states of the nanofluid due to increased cycles of its circulation; forced air

heat exchange of matte and polished surfaces of the disc by convection and radiation, as well as thermal conductivity used to heat the friction belts of the disc, is taken into account, which makes it possible to determine a smaller portion of the heat removed from their surfaces during braking; the accelerators of the movement of nanofluid in any aggregate state between the zones of evaporation and transport-condensation in their heated state are diffusers, and the retarders are the nanostructure of the condensation zone and transport of the disk, which cause a change in the gradients of velocity, pressure and temperature in the layers of nanofluid; with a variable thickness of the disk friction belt and

the specifics of cooling based on the “heat pipe” effect, using the finite element modeling method, evaluate the stress-strain state of the disk wall.

Conclusion

A single-disk shoe brake for drilling winches has been developed and its stress-strain state has been studied, which has improved the braking qualities for the lifting shaft of a drilling rig.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. **Aliyev A.M.** Increasing the energy capacity of friction brakes for lowering and lifting operations // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2018, v.10 (4), pp. 17-22.
2. **Volchenko N., Volchenko A., Volchenko D., Polyakov P., Malyk V., Zhuravlev D., Vytvytskyi V., Krasin P.** Features of the Estimation of the Intensity of Heat Exchange in Self-Ventilated Disk-Shoe Brakes of Vehicles. East-Eur. Journ. of enterp. technol., 2019, v.1, 47–53.
3. **Volchenko N.A., Voznyi A.V., Krasin P.S., Volchenko D.A.** Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 327(3), 032059.
4. **Kindrachuk M.V., Volchenko A.I., Volchenko D.A., Voznyi A.V., Skrypnyk V.S.** Energy Levels of Different Types of Contacts of Microirregularities of Friction Couples // Materials Materials Science, 2019, vol. 54, Issue 6.
5. **Janahmadov A.Kh., Volchenko D.A., Volchenko N.A. et al.** Disc and disc-shoe brakes in mechanical engineering. Volume 2. - Baku: "Apostrof-A", 2021. – 392 p.
6. **Afzal A., Abdul Mujeebu M.** Thermo-Mechanical and Structural Performances of Automobile Disc Brakes: A Review of Numerical and Experimental Studies. Arch. Comput. Methods Eng. 2019, 26, 1489–1513.
7. **Chufus V.S.** Intensification of cooling of friction units of string-block hulls of drilling drawworks to improve their efficiency: dis. ...cand. tech. Sciences: 131 - applied mechanics / Chufus Vasil Mikhailovich. Ivano-Frankivsk, 2021, 233 p.
8. **Kernytskyy I., Volchenko A., Szlachetka O., Horbay O., Skrypnyk V., Zhuravlev D., Bolonnyi V., Yankiv V., Humenuyk R., Polyansky P., Le'sniewska A., Walasek D., Koda E.** Complex Heat Exchange in Friction Steam of Brakes. Energies 2022, 15, 7412, 1–11.
9. **Balitskii A., Kindrachuk M., Volchenko D., Karol F. Abramek, Balitskii O., Skrypnyk V., Zhuravlev D., Bekish I., Ostashuk M., Kolesnikov V.** Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System. Energies 15, 59, 1–21. (2022),
10. **Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovskaya N., Dukhota A., Zhuravlev D., Ostashuk M., Porokhovskiy Y., Kharchenko V.** (2023) Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. East-Europ. Journ. of enterp. technol. 4(12(124)): 56-61.

UDC 629.5
DOI 10.52171/herald.287

Analysis of Influence of the Cable Lay Equipment on the Main Dimensions of Subsea Construction Vessel

A.G. Egorov¹, R.G. Goyushov², O.M. Abdullayev³

¹ *Marine Engineering Bureau, (Odessa, Ukraine)*

² *«Azerbaijan Caspian Shipping» CJSC (Baku, Azerbaijan)*

³ *«ASCO Engineering» LLC (Baku, Azerbaijan)*

For correspondence:

Oyrad Abdullayev / e-mail: oyrad-abdullayev@asco.az

Abstract

The study proposes to determine and justify the required main dimension of the subsea construction vessel (SCV) using the database method. Using the database of cable-laying vessels, dependencies were developed and mathematically described that reflect the influence of the parameters of the cable-laying equipment on the main dimension of the vessel. Using the dependencies, the previously developed nomogram for determining the main dimension of the (SCV) was supplemented. Taking into account the parameters of cable-laying operations in the Caspian Sea and relying on the developed dependencies and nomogram, the necessary special (SCV) were created to perform work on laying and repairing underwater cable lines.

Keywords: subsea operation, subsea construction vessel, supply vessel, cable lay vessel, technology equipment, special vessel, the vessel main dimension.

Submitted 17 February 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.G. Egorov, R.G. Goyushov, O.M. Abdullayev

[Analysis of Influence of the Cable Lay Equipment on the Main Dimensions of Subsea Construction Vessel]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 25-34

Sualtı texniki təminat gəmisinin əsas ölçülərinin müəyyənləşdirilməsində kabel düzmə avadanlığının təsirinin analizi

A.G. Egorov¹, R.Q. Göyüşov², O.M. Abdullayev³

¹ *Odessa Dəniz Mühəndisliyi Bürosu (Odessa, Ukrayna)*

² *"Azərbaycan Xəzər Dəniz Gəmiçiliyi" QSC (Bakı, Azərbaycan)*

³ *"ASCO Mühəndislik" MMC (Bakı, Azərbaycan)*

Xülasə

Məqalədə, verilənlər bazasından istifadə edərək, sualtı texniki dəstək gəmisinin (STDG) tələb olunan əsas ölçülərinin təyin edilib əsaslandırılması təklif edilir. Kabel düzən gəmilərin verilənlər bazasından istifadə edərək, kabel düzmə avadanlığının parametrlərinin gəminin əsas ölçülərinə təsirini təsvir edən asılılıqlar tərtib edilib. Asılılıqlardan istifadə edərək, əvvəlcədən tərtib olunmuş STDG-nin əsas ölçülərini müəyyən edən nomogram, kabel düzmə parametrləri ilə təkmilləşdirilib. Xəzər hövzəsində istifadə olunan kabel düzmə əməliyyatlarının parametrlərini nəzərə alsaq və tərtib edilmiş asılılıqlar və nomograma əsaslanaraq, STDG-nin, kabel düzmə və təmir əməliyyatlarının icrasını təmin edilməsi məqsədi ilə, tələb olunan STDG-nin əsas texniki verilənləri tərtib edilib.

Açar sözlər: sualtı texniki işlər, sualtı texniki işləri təminat gəmiləri, kabel düzən gəmilər, texnoloji avadanlıqlar, ixtisaslaşmış gəmilər, gəminin əsas ölçüləri.

Анализ влияния кабелеукладочного оборудования на главные размерения судов обеспечения подводно-технических работ

А.Г. Егоров¹, Р.Г. Гоюшов², О.М. Абдуллаев³

¹ *Морское Инженерное Бюро (Одесса, Украина)*

² *ЗАО «Азербайджанское Каспийское Морское Пароходство» (Баку, Азербайджан)*

³ *ООО «ASCO Инжиниринг» (Баку, Азербайджан)*

Аннотация

В статье предлагается определить и обосновать необходимые главные размерения судна обеспечения подводно-технических работ (СОПТР) методом базы данных. Используя базу данных кабелеукладочных судов, были разработаны и математически описаны зависимости, отражающие влияние параметров кабелеукладочного оборудования на главные размерения судна. С использованием зависимостей было дополнена разработанная ранее номограмма определения главных размерений СОПТР. Принимая во внимание используемые параметры кабелеукладочных операций в бассейне Каспийского моря и опираясь на разработанные зависимости и номограмму, были сформированы необходимые технические данные СОПТР для выполнения работ по прокладке и ремонту подводных кабельных линий.

Ключевые слова: подводно-технические работы, суда обеспечения подводно-технических работ, кабелеукладочные суда, технологическое оборудования, специализированные суда, главные размерения судна.

Introduction

In the Caspian Sea, cable-laying operations have been successfully carried out for a long time by a support vessel with mobile cable-laying equipment installed on the cargo deck. Given the closed nature of the Caspian Sea and the frequency of cable-laying operations, the need to use a special cable-laying vessel due to downtime between projects is impractical. In this paper, it is proven that a subsea construction vessel (SCV) with the appropriate equipment can be used as a cable-laying vessel.

The major factor in the solution of the tasks connected with development and service of the sea oil field objects [1] is their uninterrupted supply with electric energy. For high-quality and accident-free performance of laying and repair of sea cable routes, the corresponding vessels are necessary [2 – 5]. Considering the Caspian Sea as the closed sea, in the present work the problem of justification of use of the multipurpose Subsea Construction Vessel (SCV) is solved with the cable lay equipment installed on it, instead of the specialized cable lay vessel.

For the solution of an objective, within the research the system analysis is carried out with development of the block diagram of influence of parameters of the cable lay equipment on formation of the main dimension of SCV and the criterion function reflecting influences of the cable lay equipment on the main dimension of SCV is developed.

In the abstract, the main dimension of SCV the using cable lay equipment, with application of the database method is created and proved. For the solution of a task, was created the database of twenty-five cable lay vessels of the world fleet, reflecting in themselves key parameters is created. Using the database, dependences are and assessment

of the impact of the cable lay equipment on the main dimension of SCV is carried out. Also with use of the received dependences, the nomogram [6, 7] of definition of the main dimension of SCV developed earlier, with addition of data on the cable lay equipment was added. Using the nomogram and dependences, the SCV necessary parameters for use of the cable lay equipment were created.

Research objective

Using the database of cable lay vessels, having made dependences of influence of the cable lay equipment parameters on the main dimensions of the vessel and having added the nomogram developed earlier, to determine the SCV necessary parameters for performance of cable lay operations.

Problem definition

To create necessary main dimensions of SCV for performance of cable lay operations, investigating influence of parameters of the cable lay equipment on the main dimension of the vessel with use of the database of cable lay vessels parameters.

System analysis and mathematical model of influence of the cable lay equipment on the main dimension of the subsea construction vessel.

Within the research the block diagram, (Figure 1) reflecting interference of parameters of the cable lay equipment designed vessels and the nature of influence of these parameters on the main dimension of SCV was developed. Mathematical model of influence of the cable lay equipment on the main dimension of SCV being based on the offered block diagram of (Fig. 1), it is reflected by criterion function (1).

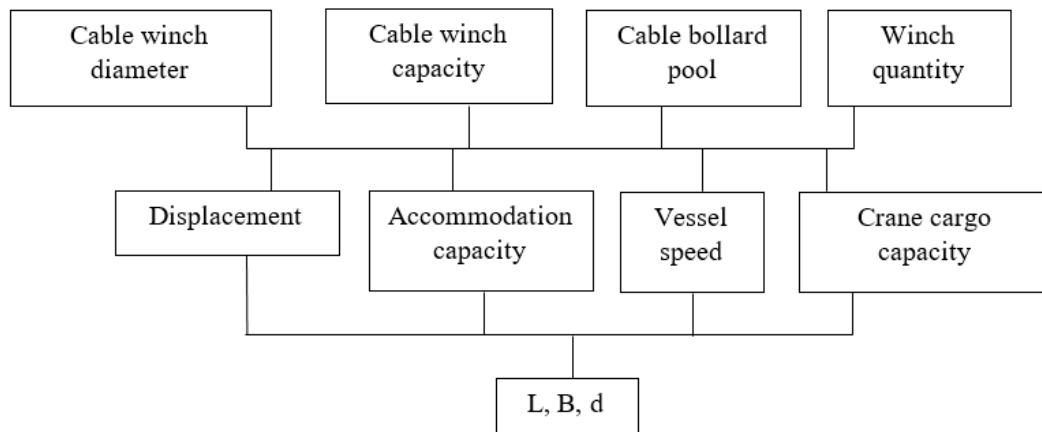


Figure 1 – Block diagram of influence of parameters of a cable lay complex on formation of the main dimension of SCV (L – the vessel length; B – the vessel width; d – the vessel draft)

$$L, B, d = S_{C.L.} f(D, S_{Ac.}, v, P_C), \quad (1)$$

here: $S_{C.L.}$ – SCV cable lay equipment elements, (D_{Winch} , V_C , P_C , n_W , D , $S_{Ac.}$, v , P_C); D_{Winch} – diameter of the winch; V_C – cable winch capacity; P_C – cable lay bollard pool; D – displacement; $S_{Ac.}$ – accommodation capacity; v – the vessel speed; n_W – winch quantity; P_C – cargo crane capacity.

Leaning on criterion function (1), dependences (see Fig. 3 – 16), influences of parameters of the cable lay equipment on technical data of SCV were developed.

Cable lay operation on the Caspian Sea and their prospects

At a sea oil field development, for providing the uninterrupted electric power, trade cable lay operations are made infield inside. Besides, are carried out laying of interstate trans-Caspian cable lines also and in process of development of the wind electric power on the Caspian Sea, there is a prospect of laying and repair of cable lines for objects of wind power industry. Long time when carrying out cable lay operations, were used

the mobile cable lay equipment installed on the cargo deck of the supply vessel [5].

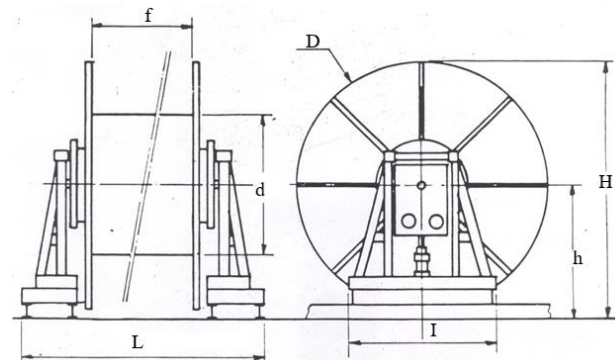


Figure 2 – The winch used when cable laying in the Caspian Sea

Lower in (Fig. 2), the appearance of the used winch is shown. The key technical data of the cable reel and the main brands of the cables which are applied when laying a subsea cable are specified in table 1 – 2.

The provided data reflected in (Fig. 2), and tables 1 and 2 act as introductory information for research of problems of formation and justification of the main dimension of SCV at use of the cable lay equipment.

Table 1 – Technical data of the cable winch

Power, kW		90.0
Speed, rpm.		0 - 1
Dimension, m		
Winch height	H	8.115
Distance from a center of the winch to the basis	h	4.215
Maximum winch diameter	D	7.8
Minimum winch diameter	d	4.4
Basis width	L	9.3
Foundation length	I	5.2
The winch utility width	f	5.0
Winch capacity, t		200
Moments, m		60000
Light weight, kg.		45000
Tension, V		380
Frequency, Hz		50

Table 2 – Brands of the cables used in the Caspian Sea

Brands of the cables	Cable sections, mm ²	Cable diameter, mm	1km cable weight, kg
ПК-6	3×70	55	6300
ПК-6	3×95	65	7600
ПК-6	3×120	75	8800
ПЭПК-35	1×70	54.45	6108
ПЭПК-35	1×95	56.2	6623

Assessment of the impact of the cable lay equipment on the main dimension of subsea construction vessel

For definition of the main dimensions of SCV, with use of the cable lay vessels database, dependences of factors of the cable lay equipment and the vessel were made and described by a formula (2) (see Fig. 3 – 16).

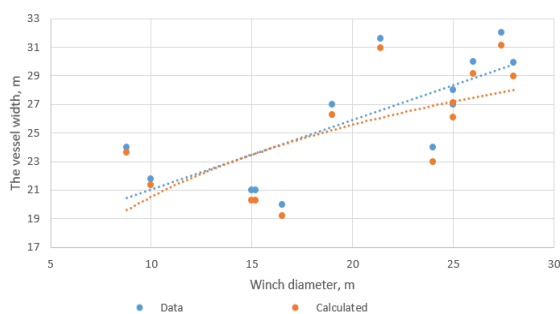


Figure 3 – Dependence of the vessel width and cable lay vessel winch diameter

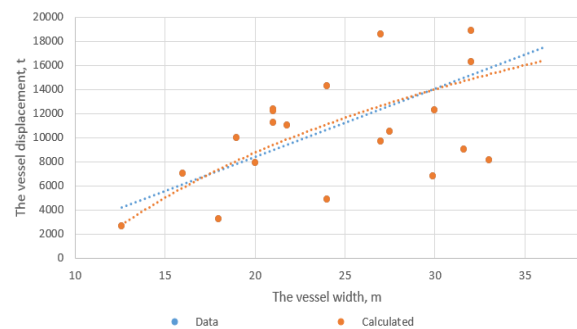


Figure 4 – Dependence the vessel width and cable lay vessel displacement

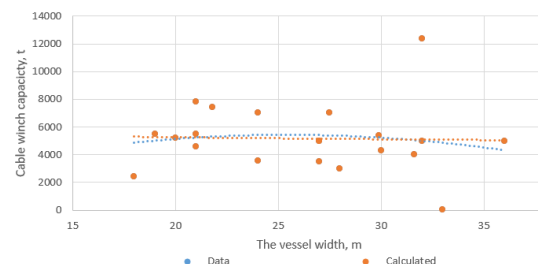


Figure 5 – Dependence the vessel width and cable winch capacity

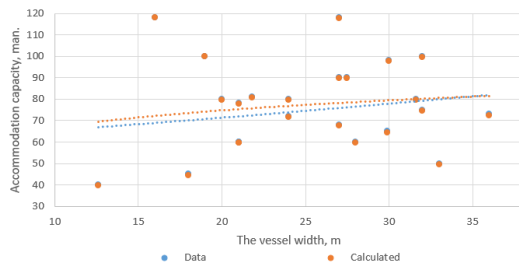


Figure 6 – Dependence the vessel width and accommodation capacity

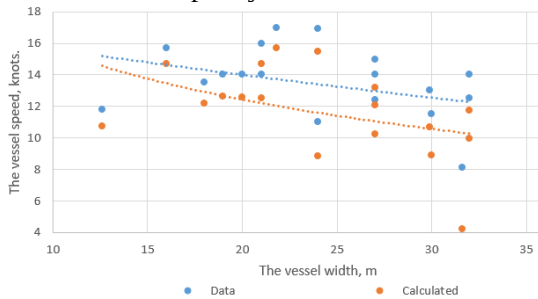


Figure 7 – Dependence the vessel width and speed

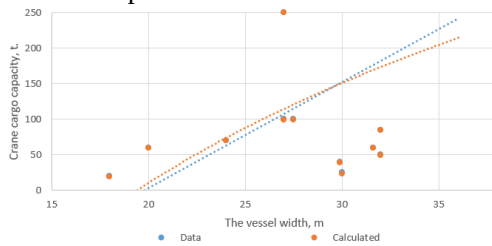


Figure 8 – Dependence the vessel width and crane cargo capacity

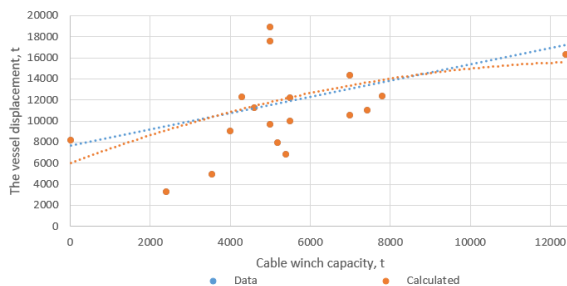


Figure 9 – Dependence the vessel displacement and cable winch capacity

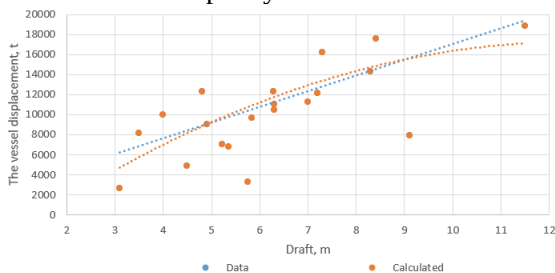


Figure 10 – Dependence the cable lay vessel displacement and draft

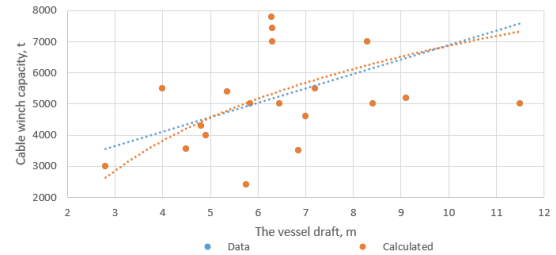


Figure 11 – Displacement the cable winch capacity and vessel draft

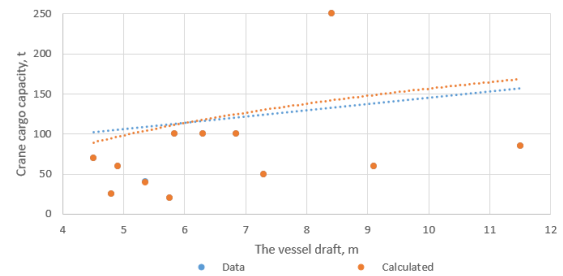


Figure 12 – Dependence the crane cargo capacity and the vessel draft

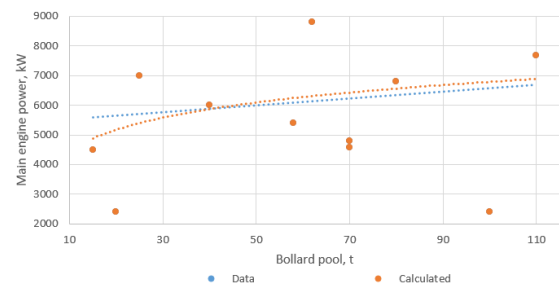


Figure 13 – Dependence the cable lay vessel main engine power and bollard pull

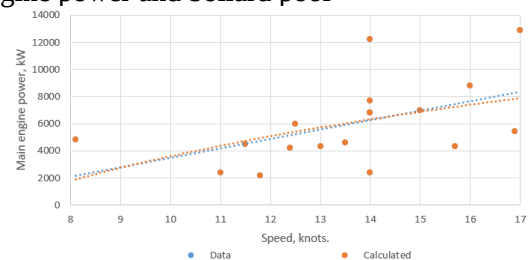


Figure 14 - Dependence the cable lay vessel main engine power and speed

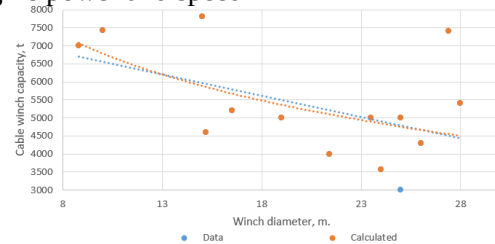


Figure 15 – Dependence the cable winch capacity and diameter

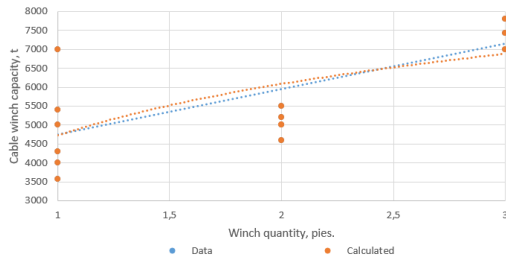


Figure 16 - Dependence the cable winch capacity and winch quantity

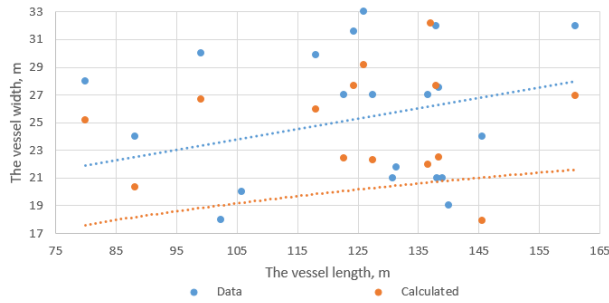


Figure 17 – Dependence the cable lay vessel length and width

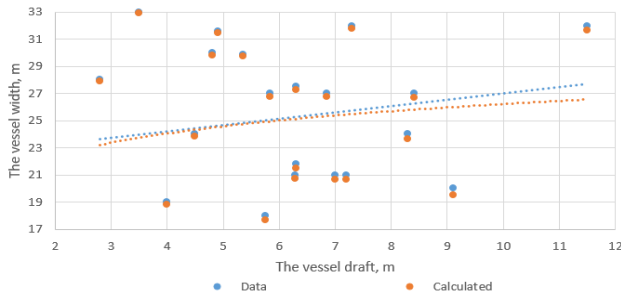


Figure 18 – Dependence the vessel draft and width

Also, with use of the database ratios of the main dimension of cable lay vessels (see Fig. 17 were created - 18), necessary for definition of the main dimension of SCV on which use of the cable lay equipment is offered.

$$C_n = b * S_{C.L.} - C_n / S_{C.L.} \quad (2)$$

here: C_n – research parameters, (L, B, d); b – correlation coefficient the considering regularity of the considered ratios determined by a formula (4); $C_n / S_{C.L.}$ – dependence the research and measured parameters.

Thus, the ratio investigated and the measured parameters it is described by expression (3):

$$C_n / S_{C.L.} = \sum_{i=1}^n C_i - b * \sum_{i=1}^n S_{C.L.} \quad (3)$$

At the same time, the correlation coefficient, is described by expression (4):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (C_n / S_{C.L.} - \overline{C_n / S_{C.L.}})(C - \overline{C_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_n / S_{C.L.} - \overline{C_n / S_{C.L.}})^2 \sum_{i=1}^n (C - \overline{C_i})^2}} \quad (4)$$

Formation of the main dimension of subsea construction vessel on parameters of the cable lay equipment

Using the conducted researches, earlier developed nomogram [6, 7], was added with the cable lay equipment parameters.

Definition of the main dimension according to the new nomogram, in (Fig. 19), is made in the listed below sequence:

1. The select of width of the vessel in the presence of the cable lay equipment in parameters reflected in horizontal scales in the bottom of the nomogram: is select the value added to the nomogram of diameter of the cable lay winch set in the conditions of design of the vessel (set in the lower part of the nomogram); we draw a vertical line before crossing from a curve the corresponding name up; from a point of intersection of the vertical line and the crossing with a vertical scale of width of the vessel to the right; the point of intersection of a horizontal line and vertical scale indicates vessel width size.

2. Determination of diameter of a cable lay winch with value of capacity of a winch: is select the value added to the nomogram, capacity of the cable lay winch set in the conditions of design of the vessel;

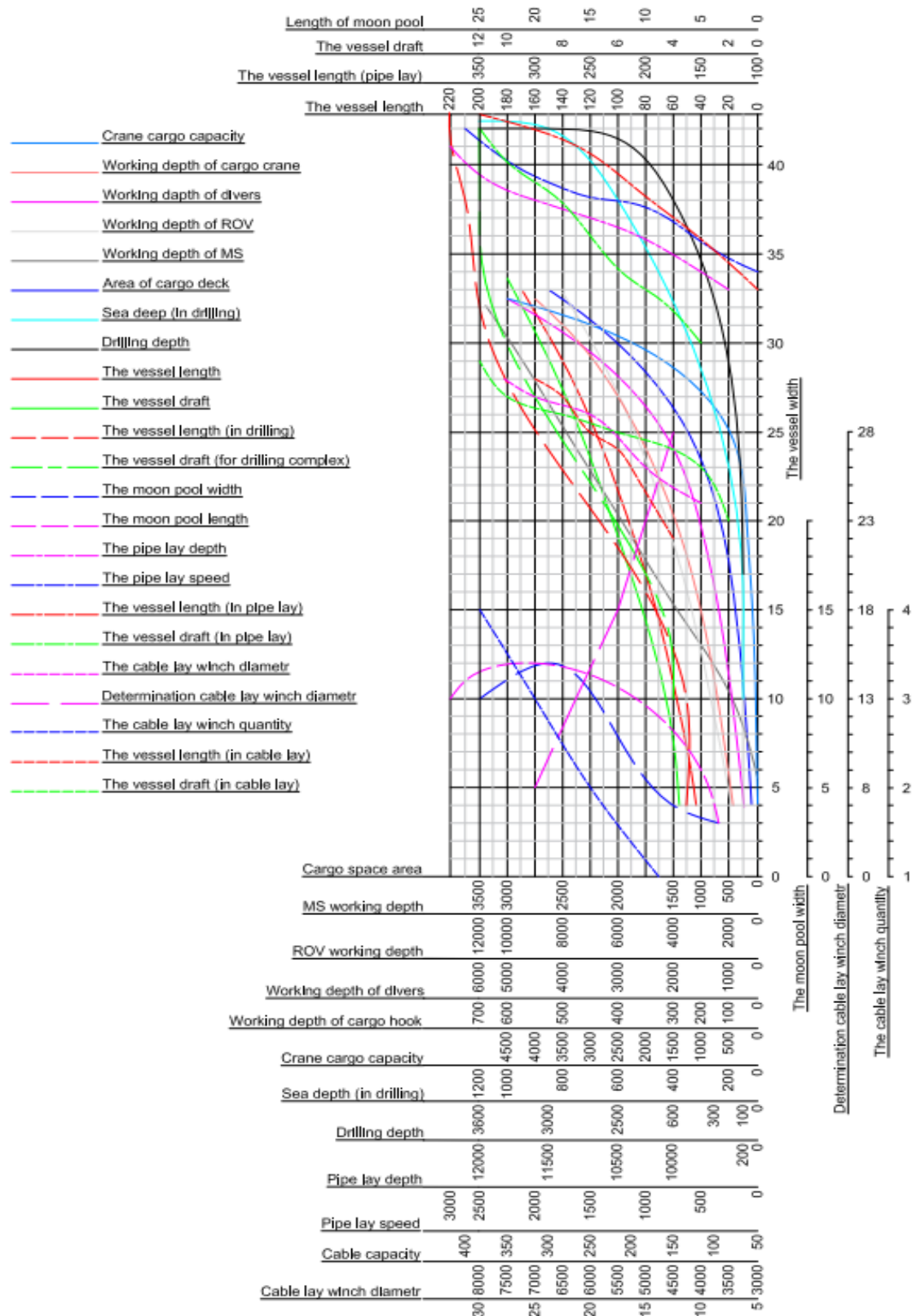


Figure 19 - The nomogram of the main dimension definition of SCV added with the cable lay equipment

we draw a vertical line before crossing from a curve of determination of diameter of a winch up; from a point of intersection of the vertical line and the corresponding curve it is drawn a horizontal line before crossing with a vertical scale of determination of diameter of a winch to the right; the point of intersection of a horizontal line and vertical scale indicates the size of diameter of a winch.

3. Determination of quantity of winch of a cable lay: select the value added to the nomogram, capacity of the cable lay winch set in the conditions of design of the vessel; draw a vertical line before crossing from a curve of quantity of winch up; from a point of intersection of the vertical line and the corresponding curve it is drawn a horizontal line before crossing with a vertical scale of determination of quantity of winch to the right; the point of intersection of a horizontal line and vertical scale indicates the size of diameter of a winch.

4. Select of length of the vessel: from the received value of width of the vessel on a vertical scale, we draw a horizontal line before crossing from the curve length of the vessel with the cable lay equipment; from a point of intersection of a horizontal line and the corresponding curve length of the vessel, we draw a vertical line to a horizontal scale in the top part of the nomogram reflecting vessel length up; the point of intersection of the vertical line and horizontal scale of length of the vessel, reflects necessary value of length of the designed vessel.

5. Select of draft of the vessel: from the received value of width of the vessel on a vertical scale, we draw a horizontal line before crossing from the curve draft of the vessel; from a point of intersection of a horizontal line and the corresponding curve draft of the

vessel, we draw a vertical line to a horizontal scale in the top part of the nomogram reflecting vessel draft up; the point of intersection of the vertical line and horizontal scale of draft of the vessel reflects necessary value of draft of the designed vessel.

Using the algorithm of design of SCV which developed earlier, the nomogram of (Fig.19) and dependence of (Fig. 3 – 18), we obtain preliminary main specifications of SCV in parameters of the cable lay equipment (see Table 3) [8, 9]. Considering that the kind of work of SCV, consists in collaboration of the established technological complexes (diving, drilling, pipe laying and cable laying modules), each of them influencing on forming the main dimension of SCV.

Table 3 – Main data the SCV with the cable lay equipment

Length, m	90
Width, m	22.0
Draft, m	3.0
Displacement, t	4500
Service speed, knots.	12.0
Cable winch capacity, t	6500
Cable winch diameter, m	12.0
Cable winch quantity, pies.	2.0
Cable lay bollard pool, t	15
Cargo crane capacity, t	50.0
Main engine power, kW	5000.0
Accommodation capacity, man.	75.0
Winch rotate speed, rpm.	1.0

At the subsequent stages of a research [10], it is supposed to perform optimization of influence of the established mobile technological complexes on the main dimension of SCV and to define optimum main dimension of SCV.

Conclusion

The system analysis is made and criterion function of influence of the cable lay equipment on the main dimension of SCV is created. The cable lay operations which are carried out in the Caspian Sea their prospect, the equipment and types of the used cables are described. Dependences of influence of the cable lay equipment on the main dimension of SCV are developed. The nomogram of

definition of the main dimension of SCV is added and the minimum main dimension of SCV necessary for performance of cable lay operations are created.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. **Ahmadov E.H.** About optimization of the process of development of oil and gas fields // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, Baku, 2020, vol.12(3), pp. 50-55.
2. **Abdullayev O.M., Sadiqov V.B.** Perspektivi sovershenstvovaniya nauchnikh osnov proyektirovaniya sudov obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot // XVII International scientific-technical conferece on «Water transport problems». Baku: 05-06 may, 2022, pp.10-12.
3. **Abdullayev O.M.** Analiz funkciy sudna obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot s uchetom technologicheskogo oborudovaniya i ocenka vliyaniya na razmeri i tekhnicheskije kharakteristiki sudna // - Baku: Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy, 2023. №1(37), pp.11-21.
4. **Egorov A.G.** Risk-based analysis of operational design restrictions and main design characteristics of subsea construction VESSELS / O.M. Abdullayev // Herald of the Odessa National Maritime University. Odessa, 2023. №1(68), pp.7-26.
5. **Karayev R.N.** Offshore floating structures for oil and gas industry. – Baku: Baku university, 2002. 328 p.
6. **Abdullayev O.M.** Razrabotka nomogrammi vibora qlavnikh razmereniy sudov obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot // XIX International scientific-technical conference on “Water transport problems”. Baku: - 02 – 03 may – 2024. – p.15-17.
7. **Abdullayev O.M.** Vibor qlavnikh razmereniy sudov obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot s ispolzovaniyem metoda bazi dannikh // - Baku: Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy, - 2024. №2(40), pp.7-18.
8. **Abdullayev O.M.** Method formirovaniya elementov algoritma proyektirovaniya sudna obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot s ispolzovaniyem bazi dannikh odnotipnix sudov // Sankt Peterburg: Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 2023. Tom15, №4, pp.680-691.
9. **Lebedeva M.P.** Algoritm proyektirovaniya sudov obespecheniya podvodno-tekhnicheskikh rabot methodom bazi dannikh / O.M. Abdullayev // Nauchniye problem vodnoqo transporta. Voljskiy Gosudarstvenniy Universitet Vodnogo Transporta. Nijniy Novgorod: 2023. №76(3), pp. 32-49.
10. **Bashirov R.D., Abdullayev O.M.** Classification of subsea construction vessels and evaluation of study effectiveness // 2nd international scientific-practical conference “Machine Building and Energy: New Concepts and Technologies”, Baku 2024. Vol. 148, pp. 217-223.

UDC 23660-79

DOI 10.52171/herald.291

Study of the Camshaft Feed of an Internal Combustion Engine

A.G. Huseynov, A.F. Kerimov

Azerbaijan Technical University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Azad Kerimov / e-mail: azad.kerimov@aztu.edu.az

Abstract

The article examines the factors affecting the wear of camshafts of internal combustion engines during operation, provides information on measures to reduce and eliminate them, and discusses the measurement technique and the results of wear of the camshaft cam, which is the object of the study. As is known, the camshaft, as one of the main parts of the gas distribution mechanism, has a direct impact on the synchronous operation of the engine, fuel consumption and environmental pollution. Its failure is considered an operation that requires an expensive repair process. Studying the wear of the camshaft is important for targeted determination of the volume of strengthening and restoration work, as well as for the correct determination of the cause of its failure.

Keywords: camshaft, wear, repair, rise height, cam wear.

Submitted 9 June 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.G. Huseynov, A.F. Kerimov

[Study of the Camshaft Feed of an Internal Combustion Engine]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 35-46

Daxili yanma mühərrikiinin paylayıcı valinin yeyilməsinin öyrənilməsi

Ə.G. Hüseynov, A.F. Kərimov

Azərbaycan Texniki Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə daxili yanma mühərriklərinin paylayıcı vallarının istismarı dövründə yeyilməsinə təsir göstərən amillər araşdırılaraq, onların azaldılması və aradan qaldırılması tədbirləri haqqında məlumat verilərək tədqiqat obyekti olan paylayıcı valın yumrucuqlarının yeyilməsinin ölçülmə metodikası və nəticələrindən bəhs edilmişdir. Bildiyimiz kimi qazpaylayıcı val qazpaylama mexanizminin əsas hissələrindən biri olaraq mühərrikin sinxron işləməsi, yanacaq sərfiyyatı və ətraf mühitin çirklənməsinə birbaşa təsir göstərir. Onun sıradan çıxması bahalı təmir prosesi tələb edən əməliyyat hesab olunur. Paylayıcı valın möhkəmləndirmə və bərpa işlərinin məqsədyönlü müəyyən olunmasına görə yeyilməsinin öyrənilməsi onun sıradan çıxma səbəbinin düzgün təyin edilməsi üçün vacibdir.

Açar sözlər: paylayıcı val, yeyilmə, təmir, qalxma hündürlüyü, yumrucuğun yeyilməsi.

Изучение износа распределительного вала двигателя внутреннего сгорания

А.Г. Гусейнов, А.Ф. Керимов

Азербайджанский технический университет (Баку, Азербайджан)

Аннотация

В статье рассматриваются факторы, влияющие на износ распределительных валов двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации, приводятся сведения о мерах по их снижению и устранению, а также обсуждаются методика измерения и результаты износа кулачка распределительного вала, являющегося объектом исследования. Как известно, распределительный вал, как одна из основных деталей газораспределительного механизма, оказывает непосредственное влияние на синхронную работу двигателя, расход топлива и загрязнение окружающей среды. Его выход из строя считается операцией, требующей дорогостоящего процесса ремонта. Изучение износа распределительного вала имеет важное значение для целенаправленного определения объема упрочняющих и восстановительных работ, а также для правильного определения причины его выхода из строя.

Ключевые слова: распределительный вал, износ, ремонт, высота подъема, износ кулачка.

Giriş

Daxili yanma mühərriklərinin (DYM) etibarlılığı onu təşkil edən mexanizm, düyün və hissələrin etibarlılıq göstəricilərindən asılıdır. DYM-ni təşkil edən mexanizmlərdən biri qazpaylayıcı mexanizmdir (QPM) ki, onun etibarlılığı əsasən paylayıcı valın texniki vəziyyətindən asılıdır [1-3]. Paylayıcı val DYM-nin istismar göstəricilərinə təsir göstərən əsas hissədir. Paylayıcı valın nasaz vəziyyətə düşməsinə əsas səbəblər kimi onun deformasiyasını, dayaq boyuncuqlarının və yumrucuqlarının yeyilməsini göstərmək olar. Yumrucuqların yeyilməsinə yağlama prosesinin müxtəlif səbəblərdən düzgün olmaması, mühərrikin həddən artıq qızması və uzun müddət istismar olunması səbəb ola bilər. Yağlamanın düzgün olmamasına səbəb yağın keyfiyyətinin pisləşməsi, yağ kanalında tıxac yaranması, yağ səviyyəsinin normadan az olması və s. amillər təsir göstərir [4-5].

İşin məqsədi

Məqalədə DYM-nin QPM-nin paylayıcı vallarının yumrucuqlarının yeyilməsinin analizi və onların təhlilidir.

Tədqiqat obyekti – DYM-nin QPM-nin paylayıcı valının yumrucuqlarıdır.

Avadanlıq – KamAZ-740 markalı yük avtomobilinin daxili yanma mühərrikinin paylayıcı valı; ПБМ-500 qurğusu; böyüdücü şüşə; DÜİST 4381-80 üzrə MP-50 modelli mikrometr; DÜİST 577-68 üzrə saat tipli indiqator.

Paylayıcı valın texniki tələblərinin ədəbiyyat araşdırması

Paylayıcı valın pəstahı isti ştamplama ilə 18XГT markalı poladdan hazırlanır. Materialın kimyəvi tərkibi cədvəl 1-də verilmişdir. Paylayıcı val əsasən – dayaq boyuncuqları (klapanların yaratdığı əks qüvvələri dəf etmək və silindrlər başlığında balanslaşaraq yığılmasını təmin etmək üçün beş ədəd dayaq boyuncuğu var), giriş və çıxış yumrucuqları, paylayıcı dişli çarx üçün pillə, işkil yuvası və mərkəzi dəşiklərindən ibarətdir [2].

Sementləşdirmədən sonra dayaq boyuncuqları və yumrucuqların səthləri yüksək tezlikli cərəyanlarla bərkidilir. Boyuncuqların və yumrucuqların səthləri dəqiq mexaniki emal olunur: pardaxlanır, cilalanır və sonra fosfatlanır.

İkinci, üçüncü və dördüncü boyuncuqların səthlərinin birinci və beşinci boyuncuqların oxuna nisbi vurması 0,025 mm-dən çox olmamalıdır. Dayaq boyuncuqlarının silindriklikdən meyllənməsi 0,005 mm, birinci və beşinci boyuncuqların səthinə nisbətən bütün yumrucuqların paralellikdən meyllənməsi 0,05 mm-dən çox olmamalıdır [1-6].

Əvəzedici material kimi 30XГT, 25XГT, 12XH3A, 12X2H4A, 20XH2M, 14XГCH2MA markalı poladlardan hazırlana bilər. Paylayıcı val dəyişən qüvvə və zərbə yüklərin təsirinə altında işləyə bilmə qabiliyyətini artırmaq üçün onun sürtünən səthlərinin sementlənməsi aparılır [6-8].

Cədvəl 1 - 18XГT markalı poladın kimyəvi tərkibi %-lə

Table 1 – 18XГT chemical composition of alloyed steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	N	W	Fe
0,17-0,23	0,17-0,37	0,8-1,1	<0,035	<0,035	1-1,3	<0,11	<0,03	<0,05	0,03-0,09	<0,3	<0,012	<0,2	əsas

Ədəbiyyat araşdırmasına əsasən Kamaz 740 yük avtomobilinin DYM-nin QPM-nin paylayıcı valının iş qabiliyyətliyinin pozulması hallarına nəzarət üçün texniki tələblər və

etibarlıq parametrləri cədvəl 2-də verilmişdir [5-6]. Şəkil 1-də Kamaz 740 yük avtomobilinin mühərrikinin paylayıcı valına qoyulan texniki tələblər.

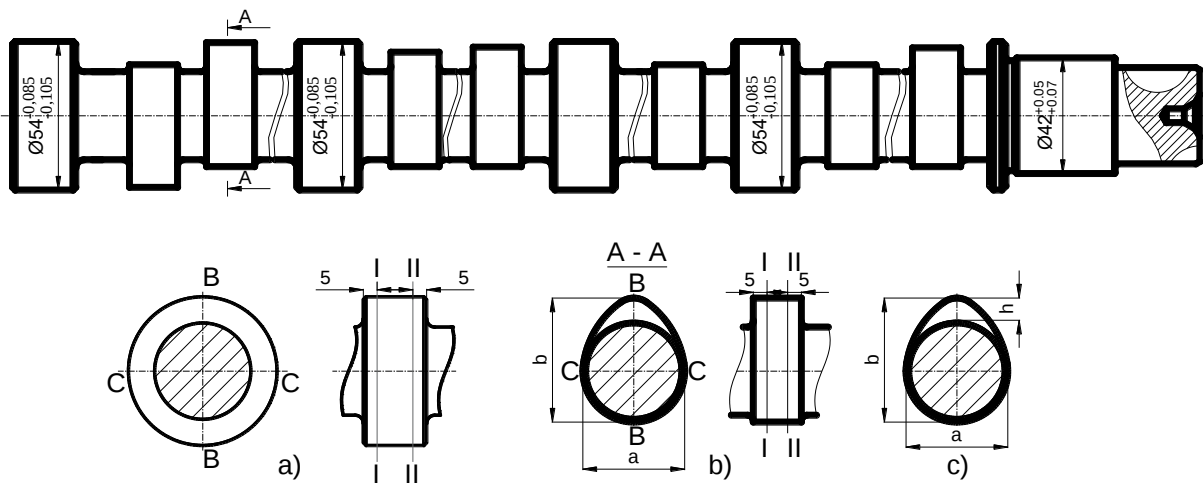
Cədvəl 2 – Kamaz 740 yük avtomobilinin mühərrikinin qaz paylayıcı mexanizminin mühərrikinin paylayıcı valın qüsurlarına qoyulan texniki tələblər xəritəsi

Table 2 – Technical requirements for the defects of the camshaft of the gas distribution mechanism of the KamAZ-740 truck engine

Şəkil 1-ə bax	Hissənin adı		Paylayıcı val		
	Hissənin №		740.1006.015		
	Material		18XIT		
	Bərklik		Dayaq boyuncuğu və yumrucuğun səhi bəkliliyi 58-63 HRC ₃ -dir		
Eskiz üzrə qüsurlar №	Ehtimal olunan qüsurlar	Qüsurların aşkarlanması üsulu və ölçü avadanlığı	Ölçü, mm-lə	Nəticə	
			İşçi çertiyoj	Təmir olunmadan buraxıla bilən	
–	Müxtəlif xarakterli çatlar	Ümumi baxış, qüsurların aşkarlama qurğusu	–	–	Yararsız
1	Yumrucuğun uc hissəsində qopmalar	Ümumi baxış, ştangen pərgar ŞP-11-250-0,05 DÜİST 166-80	–	–	Qopmaların ölçüsü 3 mm-dən çox olduqda, yararsız
2	Yumrucuğun silindrik hissəsinin ölçü azalması “a”	Kalibr 36, 00	a=37 0,05	2	Yumrucuğun silindrik hissəsinin ölçü azalması “a”
3	Giriş və çıxış yumrucuqlarının qalxma hündürlüyünün yeyilməsi “h”	Yumrucuq profilinə nəzarət etmək üçün tərtibat	h=8,05±0,1	h=7,9	Profilin ölçüsünə uyğun h ölçüsünü üstəritmə ilə təmin etməli
4	Qabaq və aralıq dayaq boyuncuqlarının yeyilməsi Ölçülər: I təmir II təmir	Kalibr bənd CP-50-75 53,69 53,49	$\varnothing 54_{-0,105}^{+0,085}$ $\varnothing 53,7_{-0,110}^{+0,090}$ $\varnothing 53,5_{-0,110}^{+0,090}$	53,88 53,59	Təmir ölçüsünə pardaqlamaqla uyğunlaşdırılmalı

Cədvəl 2-nin davamı

5	Paylayıcı valın əyilməsi	Valın əyilməsi ölçmək üçün tərtibat ПБМ-500	Aralıq dayaq boyuncuqlarının əyilməsi 0,025 çox olmamalı	0,035	Düzləndirilməli
6	Arxa dayaq boyuncuğunun yeyilməsi Ölçülər: I təmir II təmir	Kalibr bənd CP 25-50 41,73 41,53	$\varnothing 42_{-0,070}^{-0,050}$ $\varnothing 41,8_{-0,070}^{-0,050}$ $\varnothing 41,6_{-0,070}^{-0,050}$	41,93 41,59	Təmir ölçüsünə pardaxlamaqla uyğunlaşdırılmalı
7	Dişli çarx oturan boyunun yeyilməsi	Kalibr bənd 35,01	$\varnothing 35_{+0,018}^{+0,035}$	35,01	Yararlı
8	İşkilin yeyilməsi	Kalibr 5	$\varnothing 5_{-0,055}^{-0,010}$	5	180°-li bucaq altında yeni işkil frezləməli



Şəkil 1 – Paylayıcı valın yumrucuqlarının ölçülmə sxemi

Figure 1 – Measurement scheme of camshaft cams

Avro-1 Kamaz mühərriklərinin 740.21 paylayıcı valları 740.10-la müqayisədə yumrucuqları, qabaq və aralıq dayaq boyuncuqlarının ölçüləri 6 mm böyüdülməklə eyni zamanda klapanların açılma və yanacağı verilmə vaxtı dəyişdirilmişdir. 740.21 paylayıcı valının qüsurlarına qoyulan texniki tələblər və qüsurların aradan qaldırılması üsullarının xəritəsi cədvəl 3-də verilmişdir [8]. Ədəbiyyatda [7]

göstərilən Kamaz 740.21 yük avtomobilinin DYM-nin QPM-nin paylayıcı valının parametrləri.

Cədvəl 3-də göstərilən parametrlər şəkil 2 və [7] -də təyin olunma üsulu əsasında təyin edilmişdir.

Müəllifin [7] araşdırmasına əsasən paylayıcı valın əsas qusuru profildə bir qədər yeyilmə ilə yumrucuğun təpəsinin yeyilməsidir.

İstismar çirkələrindən təmizlənmiş vallar dayaq boyuncuqları, yumrucuqlar və işkil yuvalarının qüsuru aşkarlanır. Qüsurlar aradan qaldırıldıqdan sonra, bərpa tələb edən yumrucuqları olan paylayıcı valları səthinə örtük çəkilmək üçün yönəldilir.

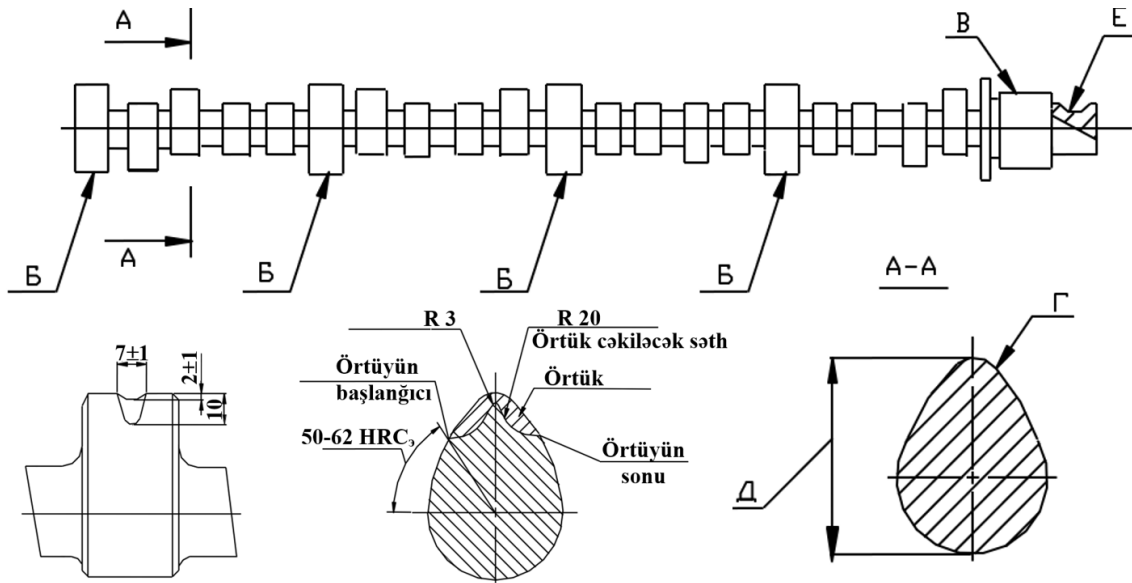
Örtük çəkmədən əvvəl, yeyilmiş yumrucuq profilində nov emal olunur (şəkl. 2).

Novun olması elektrodun əridilməsi, örtük çəkmə vaxtını azaltmaq və təmir edilmiş paylayıcı valın keyfiyyətini yüksəltməyə imkan verir [7].

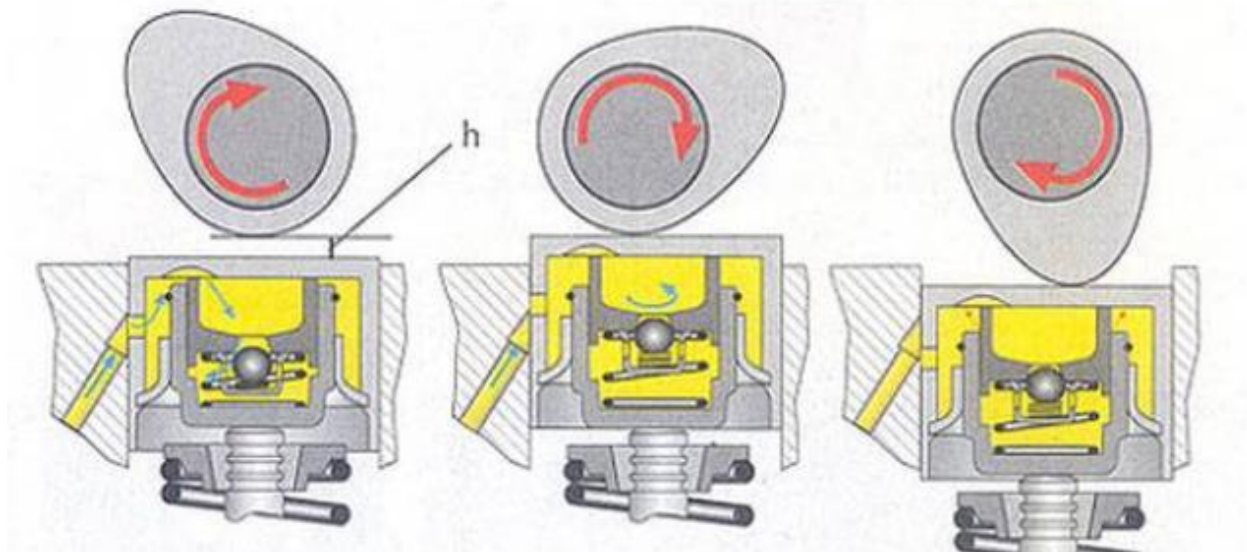
Cədvəl 3 – Paylayıcı valın qüsurlarının araşdırılma xəritəsi

Table 3 – Investigation map of camshaft defects

Kataloq üzrə №-si		Adı	Material	Bərklik	
740.21-1006015		Paylayıcı val	Polad18XGT		
Qüsurun №-si	İşarəsi	Yaranan qüsurlar	Ölçü, mm-lə		Qüsurların aradan qaldırılma üsulu
			Nominal	Təmir olunmadan buraxıla bilən	
1		Çat və ya qırılmalar			Yararsız
2	Б	Aralıq dayaq boyuncuqlarının yeyilməsi	$\varnothing 60 \begin{smallmatrix} -0.085 \\ -0.105 \end{smallmatrix}$	$\varnothing 59,88$	$\varnothing 59,85 \begin{smallmatrix} -0.085 \\ -0.105 \end{smallmatrix}$ təmir ölçüsünə mexaniki emal
3	В	Arxa dayaq boyuncuqlarının yeyilməsi	$\varnothing 42 \begin{smallmatrix} -0.05 \\ -0.07 \end{smallmatrix}$	$\varnothing 41,92$	$\varnothing 41 \begin{smallmatrix} -0.05 \\ -0.07 \end{smallmatrix}$ təmir ölçü-sünə mexaniki emal
4	Г	Yumrucuğun təpəsinin yeyilməsi	50,70±0,05 (giriş) 50,87±0,05 (çıxış)	50,60	1. Yeyilmiş profili 2-3 mm dərinliyə qədər pardaxlamalı. 2. Yumrucuqların təpəsinə örtük çəkməli, onları nominal ölçüyə emal etməli
	Д	Yumrucuğun profilinin yeyilməsi	41,6±0,05 (giriş) 42,0±0,05 (çıxış)	41,5	Yumrucuqların profilinə örtük çəkməli, onları nominal ölçüyə emal etməli
5		Valın əyilməsi	Aralıq dayaq boyuncuqlarının kənar dayaq boyuncuqlarının mərkəz oxuna nisbətən əyilməsi 0,025 çox olmamalı	0,035	Düzləndirilməli
6	Е	İşkilin deformasiyası	$5 \begin{smallmatrix} -0.010 \\ -0.055 \end{smallmatrix}$	5,01	1. Qaynaq 2. Pardaxlamalı



Şəkil 2 – Paylayıcı valının qüsurlarının araşdırma və təmir sxemi
Figure 2 – Inspection and repair scheme of camshaft defects



Şəkil 3 – Yumrucuq itələyici cütü
Figure 3 – Cam-follower pair

Şəkil 3-də yumrucuq itələyici cütü təsvir edilmişdir. Təsvirdən göründüyü kimi yumrucuqla itələyici arasında zərbənin baş verməsi (yumrucuqla itələyici arasındakı kontaktın başlanğıcı) zərbəli mexaniki yeyilmə, yağlamada (yağın tərkibindəki abrazivlərin təsirinə) abraziv yeyilmə, yumrucuğun təpəsində

(yüksək təzyiqli kontaktda baş verən sürtünmədən) fretink yeyilməsi baş verir. Bu yeyilmələrin mühərrikin qazpaylayıcı mexanizminin iş prinsipinə mənfi təsir göstərərək nəticədə onun etibarlılıq göstəriciləri texniki tələbləri ödəmir.

Müəllifin [7] qeyd etdiyi kimi paylayıcı

valın yumrucuğun yeyilən hissəsi onun kontaktda olduğu itələyici ilə maksimum yüklənməyə məruz qalan təpə hissəsidir. Eyni zamanda müəllif yeyilməyə məruz qalmış səthin bərpası üçün digər ədəbiyyat təhlilindən məlum olan qaynaq üsulu ilə örtük çəkmə üsulunu təklif etmişdir. Fərq yalnız örtüyün yumrucuqla ilişmə sahəsini çoxaltma və qaynaq vannasını tez formalaşdırmaq məqsədilə yumrucuğun təpəsində nov emal edilməsini təklif edir.

Yuxarıda təklif olunan örtükçəkmə üsulunun tətbiqi zaman yumrucuğun işlək profilində yaranan yüksək temperatur səbəbindən struktur və faza tərkibində müxtəlif dəyişikliklər baş verir, həndəsi ölçü və xarakterində mənfi dəyişmələrə səbəb olur. Eyni zamanda bərpa prosesindən sonra onun mexaniki emalı mürəkkəbləşir və ona sərf olunan xərclər artır. Müəlliflərin [6 – 9] təklif etdiyi üsulların hamısında bütöv paylayıcı val iştirak etdir və müəyyən deformasiyaya uğrayırlar.

Qazpaylayıcı mexanizmin etibarlılığı və mühərrikin istismar göstəricilərinə təsiri yumrucuğun yeyilməsindən bilavasitə asılıdır. Buna görə də itələyici ilə yumrucuğun kontaktda olduğu hissə müstəqil tədqiqat obyektidir.

Bunları nəzərə alaraq biz yeyilən hissənin səthi möhkəmliyinin artırılması və bərpası üçün yeni üsul təklif edirik. Təklif etdiyimiz üsul tərəfimizdən layihələndirilmiş yumrucuqlu paylayıcı valın [10, 11] sökülə bilən konstruksiyaya və hazırlanma üsuluna malikdir. Buna əsasən təklif etdiyimiz vakuumda xromlama titanlama üsulu ilə tsiklik diffuziya bərpa üsuludur. Tədqiqat işi vakuumda diffuziya tsiklik üsulu ilə səthi möhkəmliyinin artırılması və bərpası istiqamətində olacaqdır.

İstismar müddətində paylayıcı val sürünmə qüvvələri, titrəyiş, əlavə yüklər, kritik iş şəraiti, yüksək temperaturu mühit və digər

amillərin təsirinə məruz qalır. Bütün bunlar (0,05 mm-ə qədər) dayaq boyuncuqlarında səth keyfiyyətinin pozulmasına (cıızıqlar, korroziya), mexaniki zədələrə (yumrucuqların təpə hissəsində qəlpələnmə və dəliklər, dişli çarxın dişlərinin rəng dəyişməsi) və paylayıcı valın əyilməsinə (0,10 mm-ə qədər) səbəb olur. Paylayıcı valın qüsurlarının bərpası, onun iş resursunun uzadılması məqsədilə müxtəlif emal üsullarından istifadə oluna bilər. Bu üsullar arasında təmir ölçüsünə uyğun emal, çilingər mexaniki emalı, plastiki deformasiya, titrəyişli qövsü və ya səth üzərinə flüs altında üstəritmə kimi metodlar yer alır. Bu metodlar vasitəsilə paylayıcı valın zədələnmiş hissələrinin funksional xüsusiyyətləri bərpa edilə bilər.

Paylayıcı valın qüsurlarının müəyyən edilməsi üçün müvafiq yoxlama prosedurları həyata keçirilir. Bu yoxlamalar zamanı valın istənilən hissəsində, xüsusilə dayaq boyuncuqlarında və yumrucuqlarında cızıqlar və siyrilmələr, yumrucuğun təpə hissəsində qəlpələnmə və dəliklər, işkil yuvası və mərkəz yuvalarının vəziyyəti diqqətlə araşdırılır. Həmçinin, digər görünən qüsurların mövcudluğu da müəyyən edilməlidir.

Valın qüsurlarının zamanında və dəqiq müəyyən edilməsi, onun təmirinin effektivliyini artırmaqla yanaşı, əməliyyat müddətinin uzadılmasına və sistemin ümumi dayanıqlılığının təmin edilməsinə də kömək edir.

İlk öncə ümumi baxış keçirilir, gizli çatlar və ya sürüşmənin olduğu çatlar yoxlanılır. Baxış keçirmək üçün 10 dəfəyə qədər böyütmə qabiliyyətinə malik DÜİST 8309-75 üzrə lupa və defektoskopdan istifadə edilir. Əgər çat varsa paylayıcı val yararsız hesab olunur. Yumrucuğun təpə hissəsinin qəlpələnmələri və kəsilmələri yoxlanılır. Vizual baxış keçirilir və DÜİST 166-80 üzrə ŞÇ-11-250-0,05 modelli ştangenpərgarla ölçülür. Qəlpələr 3 mm-dən

çox olarsa, paylayıcı val yararsız hesab olunur. Yumrucuğun slindrik hissəsinin ölçüsünün azalmasına nəzarət kalibr bənd vasitəsilə aparılır. Nominal ölçüsü $a=37\pm 0,05$ mm, təmirsiz qəbul edilən minimum ölçüsü $a=36,6$ mm-dir. Surətköçürmə dəzgahının bazasında pardaxlmalı $a<44,0$ mm olduqda, yararsız hesab olunur. Giriş və çıxış yumrucuğun h hündürlüyünün yeyilməsinə nəzarət kalibr bənd və ya mikrometr vasitəsilə aparılır. Hündürlüyün nominal ölçüsü $h=8,05\pm 0,01$ mm, təmirsiz qəbul edilən minimum ölçüsü $h=7,9$ mm-dir. Əgər h minimum ölçüdən az olarsa, örtük çəkilməklə bərba olunaraq texniki tələblərə uyğunlaşdırılır. Ön və aralıq dayaq boyuncuqlarının yeyilməsinə nəzarət kalibr bənd və ya mikrometr vasitəsilə həyata keçrilir. Bu səthlərin təmir ölçüsünə təmir olunması üçün iki ölçü texniki tələblərdə nəzərdə tutulmuşdur. Bu məqsədlə kalibr bəndin ölçü meyarı 1-ci təmir ölçüsü üçün 53,69 mm, 2-ci təmir ölçüsü üçün isə 53,49 mm nəzərdə tutulmuşdur. Boyuncuqların nominal ölçü $\varnothing 54_{-0,105}^{-0,085}$ mm, təmirsiz qəbul edilən minimum ölçüsü $\varnothing 53,88$ mm-dir. Ölçmə nəticəsi boyuncuğun ölçüsü $\varnothing 53,88$ mm-dən az olarsa, onda 2-ci təmir ölçüsünə $\varnothing 53,6_{-0,105}^{-0,035}$ mm ölçüsünə pardaxlanmalıdır.

İkinci təmir ölçüsünün təmirsiz qəbul olunan minimal ölçüsü 53,39 mm-dir. Əyilmənin yoxlanılması valın əyilməyə nəzarət tərtibatında saat tipli indiqator vasitəsilə ölçülür. Aralıq dayaq boyuncuqlarının əyilməsi 0,025 mm-dən çox olmamalıdır. Əgər 0,025 mm həddi çox olarsa, valı balanslaşdırmaq lazımdır. Arxa dayaq boyuncuğunun yeyilməsinə nəzarət kalibr bənd və ya mikrometr vasitəsilə həyata keçrilir.

Bu səthin təmir ölçüsünə təmir olunması üçün iki ölçü texniki tələblərdə nəzərdə tutulmuşdur. Bu məqsədlə kalibr bəndin ölçü meyarı 1-ci təmir ölçüsü üçün 51,73 mm, 2-ci tə-

mir ölçüsü üçün isə 41,53 mm nəzərdə tutulmuşdur. Boyuncuğun nominal ölçü $\varnothing 42_{-0,070}^{-0,050}$ mm, təmirsiz qəbul edilən minimum ölçüsü $\varnothing 41,93$ mm-dir. Ölçmə nəticəsi əgər boyuncuğun ölçüsü $\varnothing 41,93$ mm-dən az olarsa, onda 1-ci təmir ölçüsünə $\varnothing 41,8_{-0,070}^{-0,050}$ mm ölçüsünə, yaxud ölçüsü $\varnothing 41,73$ mm-dən az olarsa, onda 2-ci təmir ölçüsünə $\varnothing 41,6_{-0,070}^{-0,050}$ mm ölçüsünə pardaxlanmalıdır. İkinci təmir ölçüsünün təmirsiz qəbul olunan minimal ölçüsü 41,5 mm-dir. Dışlı çarx oturan səthin yeyilməsinə nəzarət kalibr bənd və ya mikrometr vasitəsilə həyata keçrilir. Bu səthin nominal ölçüsü $\varnothing 35_{+0,018}^{+0,035}$ təmir olmadan qəbul edilən minimum ölçüsü $\varnothing 35,01$ mm-dir. İşkil yuvasının yeyilməsinə nəzarət 5 mm-lik kalibr tıxac vasitəsilə aparılır. İşkil yuvasının nominal ölçüsü $\varnothing 5_{-0,055}^{-0,010}$ mm-dir. Təmir olmadan qəbul edilən minimum ölçüsü $\varnothing 5$ mm-dir. Əgər 5 mm-dən çox olarsa o halda yeyilmə izlərinin tam yox olması şərti ilə frezlənir [7-9].

Paylayıcı valın prisizion hissələrinin həndəsi ölçü dəyişmələrinin təyin olunması üçün aşağıdakı metodikadan istifadə olunmuşdur.

Yumrucuqların və dayaq boyuncuqlarının yeyilmə miqdarının təyini üçün ölçmə prosesinin aparılma metodikasının sxemi şəkil 1-də verilmişdir.

Ölçmə iki en kəsik I-I və II-II olmaqla iki perpendikulyar müstəvi B-B və C-C üzrə aparılır. B-B profil üzrə yan səthinin “a” simmetriya mərkəzindən keçən müstəvi, C-C müstəvisi isə B-B müstəvisinə perpendikulyar olan müstəvidir [9].

Arxa dayaq boyuncuğundan başqa qalan boyuncuqların yeyilmə ölçüsünün təyini 1-düsturuna əsasən təyin olunur.

$$I_{ü.yey} = d_{n.min} - d_{yey} \quad (1)$$

Burada $\dot{I}_{ü.yey}$ - ümumi yeyilmə miqdarı, mm; $d_{n.min}$ -çertyoj üzrə nominal ölçünün minimum həddi, mm; d_{yey} -yeyilmiş yumrucuğun ən kiçik ölçüsüdür. Hesabat nəticələri cədvəl 4-də qeyd olunur.

Birtərəfli qeyri-bərabər yeyilmə miqdarının təyin olunması üçün 2 düsturundan istifadə olunur.

$$\dot{I}_{b.tər} = \beta \cdot \dot{I}_{ü.yey} \quad (2)$$

Burada $\dot{I}_{b.tər}$ -birtərəfli qeyri-bərabər yeyilmə, mm; β -qeyri-bərabərlik əmsalı $\beta = 0,6$.

Hesabat nəticələri cədvəl 4-də qeyd olunur.

Boyuncuqların qeyri-silindrikliyi və konusluluğu qiymətləri uyğun olaraq 3 və 4 ifadələri ilə hesablanır.

$$\Delta_{q.s} = d_{B-B} - d_{C-C}, \quad (3)$$

$$\Delta_k = d_{I-I} - d_{II-II}, \quad (4)$$

Burada $\Delta_{q.s}$ -boyuncuğun qeyri silindrikliyi, mm; Δ_k -boyuncuğun konusluğudur, mm. Hər boyuncuğun iki qeyri silindrik və iki konusluluq qiyməti alınır. Alınmış qiymətlərdən böyüyü seçilərək cədvəl 4-də qeyd olunur.

Təmir ölçüsü daxilidə yeyilmiş boyuncuğun mexaniki emal payı ən çox yeyilmiş boyuncuğun ölçüsünə əsasən 1 ifadəsi ilə hesablanır.

$$d_t = d_{yey} - \dot{I}_{b.tər} = 2Z, \quad (5)$$

d_t - təmir olunacaq boyuncuğun ən böyük qiymətidir, mm; Z – bir tərəfə düşən minimum emal payıdır (pardaxlama üçün $2Z=0,05$ mm). Alınan nəticələr hesabatda qeyd edilir. Dayaq boyuncuqları üçün təmir ölçüləri cədvəl 2-yə əsasən təyin olunur. Yumrucuqların vəziyyətinin müəyyənəşdirilməsi üçün uyğun olaraq yumrucuqların yan səthlərindən 5 mm aralı olmaq şərtilə iki en kəsikdə silindrik hissəsinin diametrlərini “a” və hündürlüyünü “b” mikrometrlə ölçərək hər bir yumrucuğun “h” qalxma hündürlüyünü tapırıq. Yumrucuqların qalxma hündürlüyü (1) ifadəsi ilə təyin olunur.

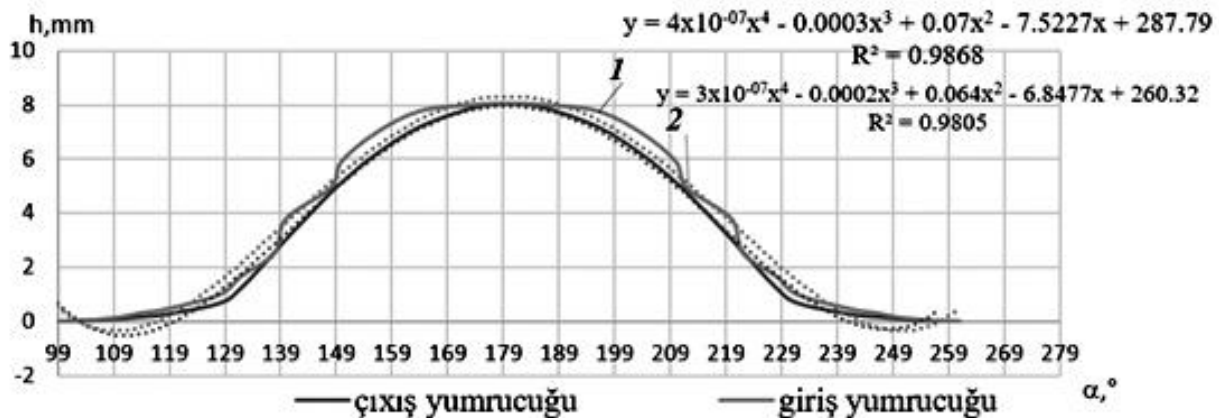
$$h=b-a \quad (6)$$

Ölçmə nəticələri cədvəl 4-də verilmişdir.

Burada müəllif [7] bucaq dəyişməsindən asılı olaraq “h” kəmiyyətinin minimum və maksimum qiymətlərini vermişdir. Məlumatların Microsoft Excel proqramında emalı cədvəl 4-də verilmişdir.

Cədvəl 4 – Yumrucuğun profilinin yeyilməsini xarakterizə edən h kəmiyyətinin bucağa uyğun qiymətləri
Table 4 – Angle-dependent values of the parameter h characterizing cam lobe wear

Çıxış						Giriş					
α^0	h, mm	α^0	h, mm	α^0	h, mm	α^0	h, mm	α^0	h, mm	α^0	h, mm
99	0,000	128	0,656	150	5,142	99	0,000	128	0,967	150	5,901
104	0,019	132	1,235	156	6,163	104	0,027	132	1,663	156	6,939
110	0,088	138	2,562	164	7,200	110	0,138	138	2,520	164	7,769
114	0,156	140	3,034	174	7,929	114	0,300	140	3,788	174	8,005
118	0,236	148	4,759	180	8,050	118	0,419	148	4,922	180	8,050



Şəkil 4– Paylayıcı valın profilinin bucaqdan asılı olaraq giriş və çıxış yumrucuqlarının qalxma hündürlüyünün müqayisə qrafiki

Figure 4 – Comparison graph of intake and exhaust cam lobe lift height versus camshaft angle

Paylayıcı valın giriş və çıxış yumrucuqlarının qalxma hündürlüyünün “h” yeyilməsinin bucaqdan asılı olaraq profilinin yeyilməsinin qrafik təsviri şəkil 4-də verilmişdir. Şəkildən aydın görünür ki, yumrucuğun profilində h qalxma məsafəsinin başlanğıcında $\alpha = 99^\circ$ olduqda $h = 0$ və $\alpha = 180^\circ$ olduqda $h = 8,05$ qiymətini hər iki yumrucuqda eynidir. Lakin bucaq dəyişməsi 99° ilə 180° arasında olduqda “h”-ın qiymətləri müxtəlif olur [7]. Bu da imkan verir ki, yeyilmənin göstərilən qiymətlərinin dəqiqləşdirilməsi üçün öz təklif etdiyimiz üsuldən istifadə edərək yeyilmənin dəqiq qiymətini, innovativ üsul tətbiq etməklə bərpa və yeyilmənin həndəsi qiymətini təyin edək.

İlk dəfə olaraq, Azərbaycan Texniki Universitetinin “Xüsusi texnologiyalar və avadanlıqlar” kafedrasının Mütərəqqi texnologiyalar laboratoriyasında sökülə bilən yumrucuqların bərpa texnologiyası müəlliflər tərəfindən bor xromlama örtükçəkmə üsulu ilə yerinə yetrilir.

Yuxarıda göstərilən metoddan istifadə edilərək giriş və çıxış yumrucuqlarının yeyilməsini xarakterizə edən h-dan asılılıq qrafiki şəkil 4-də göstərilmişdir. Yeyilmənin Boks

Uilson metodu ilə reqressiv tənliyi alınmışdır. Həmin qrafikdə nəzəri və təcrübi əyrilərin qanunauyğunluğu təsdiq edilmişdir. Bu istiqamətdə araşdırmalarımız davam etdirilir.

Elmi tədqiqat işinin davamı olaraq yeni konstruksiyalı sökülə bilən yumrucuqların yeyilməsi, etibarlılığı diffuziya bor xromlama ilə yumrucuğun səthinin möhkəmləndirilməsi və bərpası istiqamətində dissertasiya elmi işinin aparılmasıdır. Növbəti mərhələdə sıradan çıxmış yeni konstruksiyalı yumrucuqların səthinin möhkəmləndirilməsi və bərpa edilməsinin mümkünlüyü araşdırılmışdır.

Hal hazırda yumrucuğun etibarlılığının texnoloji tələblərinin ödənilməsi və bərpa edilməsinin mümkün olan üsullarla aparılması araşdırılmışdır. Ədəbiyyat və elektron məlumat bazasından əldə olunan məlumatların təhlili və araşdırılması sınaq təcrübələri göstərir ki, xrom və titan ilə vakuum diffuziya metallaşdırması qarşıya qoyulan məqsədi və etibarlılığı təmin edəcəkdir.

Nəticə

Mövcud ədəbiyyatlar və müəlliflərin fikirlərinin araşdırılması nəticəsində məlum ol-

muşdur ki, paylayıcı valın etibarlılığı və onun hissələrinin yeyilməsi haqqında fikirlər müxtəlifdir. Tədqiqat işində məqsədlərdən biridə onların dəqiqləşdirilməsidir.

Ədəbiyyat araşdırmasından məlum olmuşdur ki, yumrucuğunun təmir ölçüsü mümkünsüzdür və onun profil üzrə yeyilməsi çox kiçik olmasına baxmayaraq təpəsinin yeyilməsi paylayıcı valın ən çox iş qabiliyyətinin itirilməsinə səbəb olan halıdır.

Göstərilən ölçü metodika əsasında müəllif tərəfindən təmir fondundan götürülmüş 50 ədəd KAMAZ-740 mühərrikinin paylayıcı vallarının yeyilməsi və etibarlılığı haqqında

tədqiqat aparması dissertasiya işində nəzərdə tutulmuşdur.

Paylayıcı valın yeyilməyə məruz qalan səthinin möhkəmliyinin artırılması və bərpa işləri AzTU-nun “Xüsusi texnologiyalar və avadanlıqlar” kafedrasında Ə.G. Hüseynovun rəhbərliyi ilə müəllif tərəfindən yerinə yetirilir.

Maraqlar münaqişəsi

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

REFERENCES

1. **Huseynov A., Nazarov I., Huseynli F., Safarov M.** Determination of deformation and machining allowance of precision parts hardened by laser method RT&A_SI 2025, # 7(83) Vol.20.
2. **Hüseynov Ə.G., Abbasov V.A., Əsədov Ş.N., Kərimov A.F.** Paylayıcı valların konstruktiv və istismar xüsusiyyətlərinin onun etibarlılığına təsiri. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. Bakı, 2024, cild, 16 (4), s. 17-26.
3. **Abbasov V., Amirov F., Karimov A.** Wear properties of camshaft cams and improvement of their wear resistance. RT&A_SI 2025, # 7(83) Vol.20.
4. https://kovsh.com/library/ice/gas_distribution_mech/camshaft/defektatc_raspreditel_val
5. **Irgashev A., Hamroev R.K.** Eksperimentalnaja ocenka koncentracii produktov iznosa v masle agregatov mashin // Universum: tehnicheckie nauki. – M., 2020, № 11 (80), s. 66–68.
6. **Barun V.N., Azamatov R.A., Trynov V.A. i dr.** Avtomobili KamAZ: Tehniceskoe obsluzhivanie i remont. – M.: Transport, 1984. – 251 s.
7. <https://studfile.net/preview/3864807>
8. <https://studfile.net/preview/3180270/page:4/>
9. <https://studfile.net/preview/9593859/page:7/>
10. **Summanen A. V., Ugolkov S. V.** Features of measuring the camshaft of internal combustion engines // System analysis and logistics.: №4(30), ISSN 2077-5687. – Russia, Saint-Petersburg: SUAI, 2021. – Pp. 99-105.
11. https://www.researchgate.net/publication/387060334_Yumrucuqlu_paylayici_val_v_onun_hazirlanma_usulu_Potent_I2024_0109

UDC 622.276

DOI 10.52171/herald.293

Characteristic Features of the Movement of Elastic-Viscoplastic Fluid in Pipelines and Formations

Kh.I. Dadash-zade, V.Z. Makhmudova

Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Vafa Makhmudova / e-mail: vafamahmudova63@gmail.com

Abstract

Numerous tasks of field practice are largely dependent on the physical properties of hydrocarbons, which include oil. The presence of paraffin, asphaltene and resins in oil has a significant impact on the movement regime, and, consequently, on the design of technological processes for drilling, well operation, field development and pipeline transport of oil. In many fields around the world, the process of pressure recovery when determining reservoir pressure lasts a very long time, in some cases several weeks or months, which is explained by the manifestation of nonequilibrium effects, i.e. elastic properties of liquid. Laboratory experiments have proven that if paraffins, asphaltenes and resins exist in the oil, then they give such oils viscoelastic properties, i.e., along with viscous properties, they also have elastic properties. These oils are considered from the perspective of nonequilibrium liquids, i.e., the rate of change in their internal structure is significantly lower than the rate of change in external conditions. To describe the behavior of visco-plastic-elastic properties, we propose a model taking into account the relaxing properties of the system.

Keywords: viscoplasticity, elasticity, flow rate, volumetric flow rate.

Submitted 15 March 2024

Published 24 September 2025

For citation:

Kh.I. Dadash-zade, V.Z. Makhmudova

[Characteristic Features of the Movement of Elastic-Viscoplastic Fluid in Pipelines and Formations]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 47-55

Boru kəmərlərində və laylarda elastik-özlüplastik mayenin hərəkətinin xarakterik xüsusiyyətləri

X.İ. Dadaşzadə, V.Z. Mahmudova

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Mədən praktikasının çoxsaylı məsələləri böyük dərəcədə neftin aid olduğu karbohidrogenlərin fiziki xassələrindən asılıdır. Neftdə parafinin, asfaltenin və qatranların olması hərəkət rejiminə, beləliklə, qazmanın texnoloji proseslərinin layihələndirilməsinə, quyuların istismarına, yataqların işlənməsinə və boru kəməri ilə neftin nəqlinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Dünyanın bir çox yataqlarında lay təzyiqinin təyin edilməsi zamanı təzyiqin bərpa edilməsi prosesi çox uzun müddət, bir sıra baltalarda bir neçə həftə yaxud ay davam edir ki, bu da qeyri tarazlıq effektlərinin, yəni mayenin elastiki xassələrinin təzahürü ilə izah edilir. Laboratoriya eksperimentləri sübut etdi ki, əgər neftin tərkibində parafinlər, asfaltenlər və qatranlar varsa, onda onlar belə neftlərə özlü-elastik xassələr verir, yəni özlü xassələrlə yanaşı, onlar həmçinin elastik xassələrə də malikdir. Verilən neftlərə qeyri-taraz mayələrin mövqeyindən baxılır, yəni onların daxili strukturunun dəyişmə sürəti xarici şəraitlərin dəyişmə sürətindən əhəmiyyətli dərəcədə aşağıdır.

Açar sözlər: özlüplastiklik, elastik, axın sürəti, həcmi axın sürəti.

Характерные особенности движения упруго-вязкопластичной жидкости в трубопроводах и пластах

Х.И. Дадашзаде, В.З. Махмудова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)

Аннотация

В статье рассматриваются физические свойства углеводородов, к которым относится нефть. Наличие в нефти парафина, асфальтена и смол оказывает существенное влияние на режим движения, а следовательно, на проектирование технологических процессов бурения, эксплуатации скважин, разработки месторождений и трубопроводного транспорта нефти. Во многих месторождениях мира процесс восстановления давления при определении пластового давления длится очень долго, в ряде случаев несколько недель или месяцев, что объясняется проявлением неравновесных эффектов, т.е. упругих свойств жидкости. Лабораторные эксперименты доказали, что если в составе нефти существуют парафины, асфальтены и смолы, то они придают таким нефтям вязкоупругие свойства, т.е., наряду с вязкими, они обладают также и упругими свойствами. Данные нефти рассматриваются с позиции неравновесных жидкостей, т.е. скорость изменения их внутренней структуры значительно ниже, чем скорость изменения внешних условий.

Ключевые слова: вязкопластичность, упругость, расход, объемный расход.

Введение

При бурении, разработке и транспорте жидкостей приходится встречаться с различными жидкостями, одной из которых является жидкость с упруго-вязкопластичными свойствами. Математический анализ процессов движения упруго-вязкопластичной жидкости в пласте или скважине требует дополнительных, более детальных исследований. Для решения этих задач требуется знание разделов математической физики и теории специальных функций. Поэтому в курсе бурения, нефтепромысловой геологии, разработки и эксплуатации, подземной гидравлики процессы, связанные с движением упруго-вязкопластичной жидкости, детально не рассматриваются [1 – 5].

На основе лабораторных экспериментов и промыслового анализа предложена математическая модель упруго-вязкопластической жидкости.

Цель работы – на основе модельного подхода решить основные задачи промысловой практики.

Характер процессов бурения, разработки, эксплуатации и транспортировки зависит как от искусственных методов описания, так и от множества естественных факторов. К числу важнейших естественных факторов, влияющих на поведение процесса, относятся различные свойства слагающих пласт горных пород и насыщающих его жидкостей, а также физические условия в скважине и пласте, давление и температура.

Движение жидкости может происходить как за счет использования потенциальной энергии в различных формах, так и за счет дополнительных источников. До-

полнительным источником энергии в процессе эксплуатации и разработки является приток жидкости в пласте от контура питания и при искусственных методах поддержания давления путем закачки в пласт жидкости, обладающей упругими свойствами. Отметим, что движение жидкости может происходить как за счет использования потенциальной энергии в различных формах, так и за счет дополнительных источников, в качестве которых при эксплуатации и разработке является контур питания пласта, а при искусственных методах поддержания давления – жидкость, закачиваемая в пласт и обладающая упругими свойствами.

Отметим, что для проведения анализа и регулирования поведения нефтяного или газового пласта вводится понятие о режиме пласта. При этом классификация режима проводится на основе сопоставления важнейших форм пластовой энергии. В связи с этим для режима учитываются следующие формы потенциальной энергии: потенциальная энергия жидкости в поле силы тяжести, сжатия (упругость жидкости и пласта), сжатия скопившегося свободного газа, сжатия пузырьков газа, выделившегося из раствора при снижении давления и температуры, потенциальная энергия упругого состояния самого пласта.

Анализ показывает, что форма пластовой энергии, которая является доминирующей в процессе бурения и разработки, зависит от сочетания множества переменных параметров, получаемых искусственно или естественным путем, которые в том или ином виде проявляются в ходе процесса. Применяя различные методы воздействия на пласт, можно существенно увеличить добычу нефти или газа. Отметим, что

судить о многочисленных особенностях поведения пласта только по одному режиму никак нельзя. Понятие «режим пласта» определяет лишь некоторые характерные особенности его поведения. Один и тот же режим может проявляться при разработке месторождения с весьма различным геологическим строением, с различными физико-химическими характеристиками жидкости, темпом отбора нефти и т.д.

Без учета упругости жидкости и пласта в основном различали следующие пять режимов: водонапорный, газонапорный, режим растворенного газа, гравитационный и смешанный. Наряду с вышеуказанными существует режим, который в частных случаях является доминирующим. Режим пласта называется упругим, если на поведение пласта в процессе эксплуатации существенное влияние оказывает упругость флюида. Отметим, что движение жидкости к отдельной скважине начинается за счет использования потенциальной энергии упругой деформации флюида и пласта; сначала в ближайшей окрестности забоя, а затем в более удаленных областях пласта. Кроме того, при разработке нефтяных месторождений с аномальными жидкостями понижение давления в них бывает значительным и распространяется на более отдаленные зоны. Поэтому упругая энергия нефти в пласте, то есть количество жидкости, которое при понижении давления извлекается из пласта за счет его объемной упругости и нефти, насыщающей пласт, может быть существенной. Если бы пласт и нефть были абсолютно несжимаемыми, то не только упругий запас жидкости и пласта был бы равен нулю, но и перераспределение давления в пласте происходило бы мгновенно.

Большой научный практический интерес представляют работы академика *А.Х.Мирзаджанзаде*. Одним из результатов исследований является то, что создание давления в сосуде, заполненном вязкоупругой жидкостью, со временем снижается и затем стабилизируется. При этом скорость падения давления и разница между начальным и конечным значениями зависит от его начальной величины, реологических свойств упругой системы.

Результаты опытов показывают улучшение гидродинамических свойств неньютоновской нефти. Вместе с тем, после небольшого периода разгрузки нефти обнаруживается «остаточная память», т.е. вязкоупругие свойства.

Упруго-вязко-пластичные жидкости в нефтегазодобыче применяются в трёх направлениях:

- диагностирование, применение упруго-вязко-пластичных свойств данной системы в нефтегазодобыче;
- определение и регулирование упруго-вязко-пластичных свойств этих систем;
- создание модели, описывающей основные свойства таких систем.

В последнее время нефтегазовая промышленность различных стран характеризуется введением в разработку большого количества месторождений вязкой нефти, что вызвало заметный рост удельного веса добычи таких нефтей, обладающих аномальными неньютоновскими свойствами в общем балансе. Это вызывает дополнительные затруднения в ходе процесса разработки месторождений. Реологические особенности высоковязких нефтей, обладающих упруго-вязко-пластичными свойствами, более сложные по сравнению с вязкими.

Упруго-вязко-пластичные свойства нефтей проявляются, в основном, в тяжелых высокосмолистых, парафинистых углеводородных смесях, относящихся к сложным неньютоновским системам, в которых на различных стадиях деформации могут проявляться упруго-вязко-пластичные свойства. Такая нефть обнаружена в Средней Азии, Азербайджане, Коми, Татарии, ЮАР, АРЕ и т.д.

В работе [1] предложено новое применение упругих жидкостей. Как показывает автор, при истечении из трубопровода вязкоупругой жидкости диаметр протекающей струи превосходит диаметр трубопровода в 3-4 раза. Этот эффект настолько велик, что затрудняет детальное описание процесса. Отмечено, что данный эффект может быть обусловлен сочетанием упругости жидкости и сходящимся характером линий тока на входе в трубопровод. При истечении жидкость изменяет форму, т.е. упругая жидкость уменьшается в длине и возрастает в диаметре. Данное свойство вязко-упругой жидкости объясняется значительной величиной нормальных напряжений в таких системах. Такое явление характерно и для упругой вязко-пластичной жидкости.

Промысловый анализ показывает, что добавление в определенных соотношениях в цементный раствор высокомолекулярных полимерных соединений приводит к значительному повышению полноты вытеснения глинистых растворов в скважине цементами. В данном случае цементный раствор с добавлением полимерного соединения приобретает упруго-вязко-пластичные свойства, в результате чего у стенок трубопровода возникает пристенное скольжение. Данное свойство цементного раствора из-

меняет эпюру распределения скоростей на границе раздела вытесняемой и вытесняющей жидкостей.

Лабораторные исследования показывают, что наличие нормальных напряжений и скоростей скольжения в упруго-вязко-пластичных растворах обеспечивает полное вытеснение глинистого раствора из каверн ствола скважины и эксцентричного пространства [2, 3].

Упруго вязко-пластичные свойства могут быть приданы цементным растворам водорастворимыми полимерными добавками. Применение данной жидкости в виде разделителя между цементом и глинистым раствором приводит к резкому повышению полноты вытеснения глинистого раствора.

Отметим, что применение упруго-вязко-пластичной жидкости в виде пробки в процессе бурения должно быть обязательным мероприятием. Промывка скважин при наличии данной пробки перед цементированием значительно повысит чистоту ствола и будет способствовать креплению скважины.

Таким образом, упруго-вязко-пластичные свойства жидкости увеличивают поперечные размеры струи и приводят к более полному охвату сечения скважин и пласта [4]. Исследования показали, что скорость фильтрации приобретает упруго-вязко-пластичной жидкости можно записать как:

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{1}{\rho\beta} \frac{dp}{dx} - i_0 \right) \quad (1)$$

где v – скорость фильтрации, k – проницаемость пласта относительно упруго-вязко-пластичной жидкости, μ – структурная вязкость данной жидкости, ρ – плотность жидкости, β – коэффициент объема упру-

гого расширения жидкости, i_0 – начальный градиент сдвига.

С учетом граничных условий данную формулу можно записать как:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \left(\frac{1}{\beta L} \ln \frac{p_k}{p_r} - i_0 \right) \quad (2)$$

где Q – объемный расход жидкости, F – площадь сечения пласта, p_k – плотность жидкости на контуре питания пласта, p_r – плотность жидкости у входа в галерею (т.е. на выходе из пласта), L – длина пласта.

Проведённый анализ [4, 5] показывает, что проектирование и контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений, создание и эксплуатация подземных хранилищ сопряжены с определением коллекторских свойств пород пластов и изучением их фильтрационных параметров, что, в свою очередь, вызывает необходимость более детального исследования степени неоднородности пласта по толщине и площади, наличия литологических и тектонических экранов и т.д.

Методы определения параметров пласта весьма разнообразны и зависят от тех конкретных задач, которые ставят перед собой исследователи в области нефти и газа [6].

Особо надо отметить, что гидродинамические методы исследования пластов и скважин, связанные с замерами пластовых и забойных давлений в возмущающих и реагирующих скважинах, называют пьезометрическими методами. Исследования скважин можно разделить на две большие группы: при установившихся и не установившихся режимах.

Методика позволяет выявить тот факт, что методы исследования пластов и скважин, основанные на изучении не установившихся процессов изменения забойно-

го давления в возмущающих и реагирующих скважинах, тесно связаны с теорией упругого режима. Если жидкость еще и вязко-пластичная, то процесс фильтрации и движения ее в трубах полностью изменяются. При пуске или остановке скважины с учетом упругого движения возникает длительный режим, характеризующийся процессом перераспределения давления, как в подъемных трубах, так и в пористой среде [7, 8].

Отмечается, что при помощи самопишущих скважинных манометров можно записать колебания давления в стволе скважины и построить график зависимости забойного давления от времени или кривую восстановления давления.

Чаше всего при гидродинамических исследованиях наблюдается восстановление забойного давления после остановки скважины, ранее работающей продолжительное время с постоянным дебитом, которое определяется по формуле (2).

Очевидно, что коллекторские свойства пласта, конструкция насосно-компрессорных труб, физико-химические свойства жидкости влияют на форму КВД, и поэтому по форме кривых восстановления можно определить такие показатели, как проницаемость и пьезопроводность, а также скин-эффект, конструкцию трубопровода – диаметр, глубину спуска, марку, обуславливаемые дополнительными фильтрационными сопротивлениями скважины и призабойной зоны. С целью упрощения обработки данного материала часто прибегают к преобразованию графиков восстановления давления, изменяя их криволинейную форму на прямолинейную [9 – 11].

Анализ источников зарубежной литературы [5-10] показал, что наиболее рас-

пространенным методом определения параметров скважины и пласта по данным восстановления давления в остановленной скважине является метод построения преобразованного графика восстановления давления в полулогарифмических координатах (перепад давления от логарифмического времени, форма прямой линии). Такую прямолинейную зависимость установить несложно.

На основании вышеуказанных закономерностей теории упруго-вязкопластичной жидкости можно получить следующие функциональные зависимости между динамикой забойного давления и временем с момента пуска скважины в эксплуатацию с постоянным дебитом:

$$\Delta P = P_k - P_c = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \left[-E_i \left(-\frac{r_c^2}{4\eta t} \right) \right] = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \left(\ln \frac{4\eta t}{r_c^2} - 0,5722 \right) = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \left(\ln \frac{4\eta t}{r_c^2} - \ln 1,781 \right) = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \left(2,2 \lg \frac{4\eta t}{1,781 r_c^2} \right) = 1,1832 \frac{Q\mu}{kh} \lg \frac{2,246\eta t}{r_c^2} \quad (3)$$

где r_c - приведенный радиус скважины, k - проницаемость пласта, Q - объемный расход упруго-вязкопластичной жидкости, h - мощность пласта, η - коэффициент пьезопроводности, μ - динамическая вязкость, t - время, P_k - контурное или пластовое давление, P_c - забойное давление.

Надо отметить, что последнее выражение можно переписать в ином виде:

$$\Delta P = 0,1832 \frac{Q\mu}{kh} \lg \frac{2,246\eta}{r_c^2} = 0,1832 \frac{Q\mu}{kh} \lg t \quad (4)$$

или более просто:

$$\Delta P = A + B \lg t \quad (5)$$

где $A = B \lg \frac{2,246\eta}{r_c^2}$ и $B = 0,1832 \frac{Q\mu}{kh}$.

Из данных формул видно, что изменение забойного давления в работающей скважине с постоянным дебитом эксплуатационной скважины является линейной функцией логарифма времени. Учитывая данные условия, можно сказать, что график изменения забойного давления после пуска скважины в эксплуатацию, определяемый формулой (5), является прямой линией с учетом физических свойств нефти.

Для некоторых условий необходимо определить кривую восстановления, т.е. изменение забойного давления после остановки скважины.

Принимаем, что до остановки скважины, длительно работающей с постоянным дебитом и физическими свойствами нефти, вокруг скважины в пласте имело место установившееся распределение пластового давления

$$P = P_c + \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r}{r_c} \quad (6)$$

или

$$P = P_k - \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_k}{r_c} \quad (7)$$

В данном случае пьезометрическая линия является кривой логарифмического типа. Мгновенная остановка эксплуатационной скважины в момент $t=0$ имитируется включением фиктивного источника с дебитом находящегося в заданной точке пласта.

Для сопоставления данных различных жидкостей приведем численные задачи на основе данных, заимствованных из [8].

Предположим, что в заданном пласте движется однородная жидкость с ньютоновскими свойствами.

Пример 1.

$k=1$ Дарси $=10^{-12}$ м²; $\mu=1$ спз; $\Delta P = 10^6$ кг/м², $F=100$ м².

$$\mu=1 \text{ спз}=10^{-14} \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2; \eta=\mu, L=1000 \text{ м}.$$

В качестве расчетного уравнения

$$\ln \frac{P_k}{P_c} = (P_k - P_r); Q = \frac{kF}{\mu} \frac{P_k - P_r}{L} = \frac{kF}{\mu} \frac{\Delta P}{L};$$

$$Q = \frac{10^{-12} \text{ м}^2 \cdot 100 \text{ м}^2 \cdot 10^6 \text{ кг}/\text{м}^2}{10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} \cdot 1000 \text{ м}} = 0,001 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} =$$

$$86,4 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}.$$

Пример 2.

По вышеуказанным данным в однородном пласте движется вязко-пластичная жидкость. Определим дебит пласта в данных условиях. После упрощений уравнение фильтрации для вязко-пластичных жидкостей можно записать в виде:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \frac{\Delta P - \Delta P_0}{L},$$

где P_0 для нефтей $(4,2 \div 12) 10^4 \text{ кг}/\text{м}^2$

Подставив численные значения предыдущей задачи, имеем:

$$Q = \frac{10^{-12} \text{ м}^2 \cdot 100 \text{ м}^2 (100 - 12) 10^4 \text{ кг}/\text{м}^2}{10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}} =$$

$$0,00088 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} = 76,03 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$$

Пример 3.

По указанным данным в расчетную формулу добавим коэффициент объемного упругого расширения жидкости. Согласно [3, 4], данный параметр в среднем можно принять $\beta_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{кг}$. Тогда, согласно законам гидравлики, имеем:

$$Q = \frac{kF}{\eta} \left[\frac{P_k - P_r}{L} (1 + \beta \bar{P}) - i_0 \right]$$

$$= \frac{10^{-12} \text{ м}^2 \cdot 100 \text{ м}^2}{10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}} \left[\frac{100 \cdot 10^4 \text{ кг}/\text{м}^2}{1000 \text{ м}} \left(1 + 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{кг}} \cdot 20 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right) - \frac{12 \cdot 10^4 \text{ кг}/\text{м}^2}{1000 \text{ м}} \right]$$

$$= \frac{10^{-12} \text{ м}^2 \cdot 100 \text{ м}^2}{10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}} \left[100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 20 - 120 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

$$= 0,0188 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} = 162,43 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$$

Закключение

Упругий запас энергии в пласте, т.е. количество жидкости, которое при понижении давления извлекается из пласта за счет объемной упругости аномальной жидкости и пласта, может быть существенным.

Если бы пласт и насыщающая его жидкость были абсолютно несжимаемыми, то не только упругий запас жидкости в пласте был бы равен нулю, но и перераспределение давления в пласте происходило бы мгновенно, т.е. охват пласта уменьшался бы.

Если упругий пласт и насыщающая его упругая жидкость имеют очень малые коэффициенты объемной упругости, то процессы перераспределения давления в пласте происходят весьма длительно, что частично увеличивает нефтеотдачу пластов с неньютоновскими нефтями.

Длительность перераспределения давления объясняется своеобразным характером фильтрации, на который оказывают непосредственное влияние силы сопротивления при движении вязко-пластичной жидкости в пласте.

Конфликт интересов

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

REFERENCES

1. **Mirzadzhanzade A.H., Aliev N.A., Yusifzade H.B., Salavatov T.Sh., Shejdaev A.Ch.** Fragmenty razrabotki morskikh neftegazovykh mestorozhdenij. - Baku: «Elm», 1997, 408 s.
2. **Masket M.** Techenie odnorodnykh zhidkostej v poristoj srede. - M.: «Izhevsk», 2004, 638 s.
3. **Shchelkachev V.N., Laruk B.B.** Podzemnaya gidravlika. - M.: «Izhevsk», 2001, 763 s.
4. **Shchelkachev V.N.** Razrabotka neftevodonosnykh plastov pri uprugom rezhime. - M.: «Gosizdat», 1959, 467 s.
5. **Dmitriev N.M., Kadet V.V.** Gidravlika i neftegazovaya gidromekhanika. - M.: «Izhevsk», 2016, 352 s.
6. **Houpert A.** Elements de mecanique des fluids dan les milliex poreux, Paris, Editions, Technip, 2018, 230.
7. **Ikoku C.V., Ramey H.S.** Transient flow of non-newtonian power-low fluids in porous media-Stanford University, 1979, 220 p.
8. **Joshi S.D.** Horizontal Well technology-Penn Well Books, 1991, 553 p.
9. **Marle C.** Cours de production t.IV. Les ecoulements polyphasiques-Paris. Soc. Des. Editions Technip, 1965, 175 p.
10. **Timmerman E.H.** Practical reservoir engineering, vol. 1, 2. – Tulsa, Oklahoma: Penn Well Publishing Company, 1982, 422 p.
11. **Dadashzadeh X.I., Musayeva Sh.F.** Some Peculiarities of Non-Newtonian Fluid Flow in to the Well Considering Spherical-Radial Model. Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2024, vol. 16 (4), pp. 46-51

UDC 622.276.6

DOI 10.52171/herald.296

Investigation of Gas Transportation in Main Pipelines

A.N. Gurbanov, I.Z. Sardarova, J.R. Aliyev,

S.B. Nurmammadova-Huseynova

Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

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

Abstract

The separation of liquid and mechanical solid particles from the transported gas and their deposition in the relief depressions of the pipeline lead to a violation of the regularity of the flow, which is the reason for reducing the service life of the pipeline and process equipment. In addition, condensate and mechanical solid particles contained in the gas supplied to the enterprises of the processing industry create difficulties in the normal operation of the process equipment. To separate and collect condensate and solid mechanical particles during gas transportation, the direction of the gas flow into the collection tank is changed by installing a tank for collecting condensate at the beginning and end of the pipeline in the direction of flow and installing a triangle in front of the tank, then a knee based on the specific gravity and mechanical energy of the separated mechanical particles of solids and condensate collected from the gas flow into the tanks due to the difference in their weight.

Keywords: main pipeline, condensate, mechanical solid particles, filter, condensate collection tank, density, mechanical, kinetic and potential energy.

Submitted 6 March 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.N. Gurbanov et al.

[Investigation of Gas Transportation in Main Pipelines]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 56-61

Magistral boru kəmərlərində qazın nəqlinin araşdırılması

Ə.N. Qurbanov, İ.Z. Sərdarova, C.R. Əliyev, S.B. Nurməmmədova-Hüseynova
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Maye və mexaniki bərk hissəciklərin nəql olunan qazdan ayrılması və onların boru kəmərinin relyef girintilərində çökməsi axın qanunauyğunluğunun pozulmasına gətirib çıxarır ki, bu da boru kəmərinin və texnoloji avadanlıqların istismar müddətinin azalmasına səbəb olur. Bundan əlavə, istehsalat müəssisələrinə verilən qazın tərkibində olan kondensat və mexaniki bərk maddələr texnoloji avadanlıqların normal işləməsi zamanı çətinliklər yaradır. Qazın nəqli zamanı kondensatın və bərk mexaniki hissəciklərin ayrılması və yığılması üçün xüsusi çəkisi və mexaniki enerjisi əsasında boru kəmərinin əvvəlində və sonunda axın istiqaməti üzrə kondensat toplama çəninin quraşdırılması və tutumdan əvvəl üçlük, sonra dirsək quraşdırmaqla yığıcı tutuma gedən qaz axınının istiqaməti dəyişdirilir ayrılan mexaniki bərk və kondensat hissəcikləri çəki fərqlərinə görə qaz axınından tutumlara yığılır.

Açar sözlər: magistr al boru kəməri, kondensat, mexaniki bərk hissəciklər, filtr, kondensat toplama çəni, sıxlıq, mexaniki, kinetik və potensial enerji.

Исследование транспортировки газа по магистральным газопроводам

А.Н. Гурбанов, И.З. Сардарова, Д.Р. Алиев, С.Б. Нурмамедова-Гусейнова
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)

Аннотация

Разделение жидких и механических твердых частиц из транспортируемого газа и их осаждение в рельефных углублениях трубопровода приводят к нарушению регулярности потока, что является причиной уменьшения срока службы трубопровода и технологического оборудования. Кроме того, конденсат и механические твердые частицы, содержащиеся в газе, подаваемом на предприятия обрабатывающей промышленности, создают трудности при нормальной эксплуатации технологического оборудования. Для сепарации и сбора конденсата и твердых механических частиц при транспортировке газа направление потока газа в сборную емкость изменяют путем установки емкости для сбора конденсата в начале и в конце трубопровода по направлению потока и установки треугольника перед резервуаром, затем колена, основанного на удельном весе и механической энергии отделяющихся механических частиц твердого тела и конденсата, собираемых из газового потока в резервуары за счет разницы их веса.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, конденсат, механические твердые частицы, фильтр, емкость для сбора конденсата, плотность, механическая, кинетическая и потенциальная энергии.

Introduction

Investigation of gas transportation in main pipelines result, the quantity of mechanical solid particles, such as moisture and dust, that are present in the gas that is provided to the user through the main gas pipeline occasionally exceeds the standard. In order to capture moisture and mechanical solid particles, filter separators are typically positioned at the end of the belt, and their performance is continuously tracked. There is a lot of labor involved in cleaning and replacing the separator's filter throughout the course of the day, and there is also a risk of environmental pollution and gas emissions up to the separator's nominal volume at operating pressure.

A portion of mechanical solid and condensate particles that have been separated during the transit of gas gather in depressions along the pipeline's terrain. As a result, the gas pipeline's throughput declines, hydraulic resistance pressure losses rise, flow irregularities, vibrations, and hydraulic shocks happen, and the pipeline's inner surface experiences increased corrosion and erosion. As a result, the gas pipeline is less durable and has a shorter lifespan. The operation of control measuring devices, automatic adjustment devices, and compressive compressors are negatively impacted by mechanical solid and condensate particles, which also increases errors in gas consumption measuring devices and decreases their reliability and durability [1]. Condensate and mechanical solid particles found in the gas supplied to major industrial firms make it more difficult to regulate technological operations and raise the possibility of equipment failure before its time.

Setting the issue

Research have revealed that compared to the end of the pipeline, the pressure of the gas flow is higher and the speed is lower near the entrance. In the depression zones of the pipelines, a portion of the condensate and solid particles are thus separated and gathered. Condensate and mechanical solid particles in the pipeline are removed more effectively because of the increased gas flow velocity near the belt's end. As the pressure gradually decreases throughout the pipeline's length, the liquid phase gradually evaporates, which causes the gas phase in the gas pipeline to become moist. A portion of the liquid phase in the gas pipeline transitions into the gas phase due to the rise in moisture content of gases under low pressure.

As a result of research, it was determined that As a result of research, it was determined that C_2 ; C_3 ; C_4 ; C_5 ; found in gases found in gases. In general, condensation occurs when the sum of the densities of the components is $\sum x > 1$, and condensation does not occur when $\sum x < 1$ [2].

Sour gases (H_2S and CO_2) in the gas significantly affect its thermodynamic parameters and ensure the maintenance of humidity in the gas phase [3].

Solution methods

According to the normative document "Main Pipeline Design Norms", it is recommended to install condensate collecting capacities in depressions of gas pipelines in order to check the presence of condensate and release it. In this instance, the number of condensate storage capacities likewise grows as a result of the pipeline's increased length.

Only the liquid and solid particles that have settled at the bottom of the pipe are collected in the condensate storage tanks during installation; the majority of the liquid and solid particles continue to move with the gas flow due to the influence of aerodynamic forces.

Liquid and solid particles of mass m along the belt move with the gas flow at a speed v and have a kinetic energy of $mv^2/2$ [3]. Under normal conditions, the mass of the liquid (condensate) is $\approx 760 \text{ kg/m}^3$, the mass of mechanical solid particles is $\approx 1200 \text{ kg/m}^3$, and the mass of the gas component is $\approx 0.8 \text{ kg/m}^3$.

The gas density at a given working pressure and temperature is determined by the following formula [4, 5]:

$$\rho_{work} = \frac{\rho_0 z_n T_n p_{work}}{p_n z_{work} T_{work}}$$

Right here ρ_0 – the density of a gas under normal conditions, kg/m^3 ; p_{work} – working pressure, MPa; T_{work} – working temperature, K; T_n – normal temperature, 293 K; p_n – normal pressure, $p_n = 0.102 \text{ MPa}$; z_n, z_{work} – are gas compressibility coefficients under normal and working conditions. The pressure of gas transported by main pipelines can be from 1.0 MPa to 9.0 MPa. When the working pressure is 1.0 MPa, the gas density is $\approx 8 \text{ kg/m}^3$; At 9.0 MPa, it is $\approx 70 \text{ kg/m}^3$.

In a short amount of time, the particles of the gas component, mechanical solid, and condensate all move through the pipeline's cross section at roughly the same rates, while having different masses, according to a comparison of the kinetic energy of the

particles. The kinetic energy of mechanical solid and condensate particles will be greater than the kinetic energy of gas components because their mass is ten times more than that of gas components. Due to the differences in kinetic energy brought on by the weight of the particles, it is necessary to install a condensate collection capacity in the direction of the movement flow as a continuation of the pipeline in order to separate and collect the mechanical solids and condensate particles from the gas flow. By adding a tee and an end elbow to the belt before the cap, the gas flow is continued while the direction of the flow is changed. In this situation, the condensate storage capacity serves as a trap for both condensate and mechanical solids particles. Thus, mechanical solid particles of m_b mass and condensate particles of m_k mass moving with α acceleration will be separated from the gas components by $m_b a$ and $m_k a$ forces and thrown into the condensate storage capacity, and will sink to the bottom of the capacity due to $m_b g$ and $m_k g$ gravities. Aerodynamic forces are avoided and the separation of settled mechanical solid and condensate particles is guaranteed because the gas flow inside the tank is not moving.

The major gas pipeline's proposed technological layout is shown in Figure 1. Condensate collection capacity were placed in the beginning and end portions of the pipeline as a continuation of the pipeline in order to improve the quality indicators of the gas provided to the consumer. By adding a tee and then an elbow to the belt before the tanks, the gas flow's direction was adjusted.

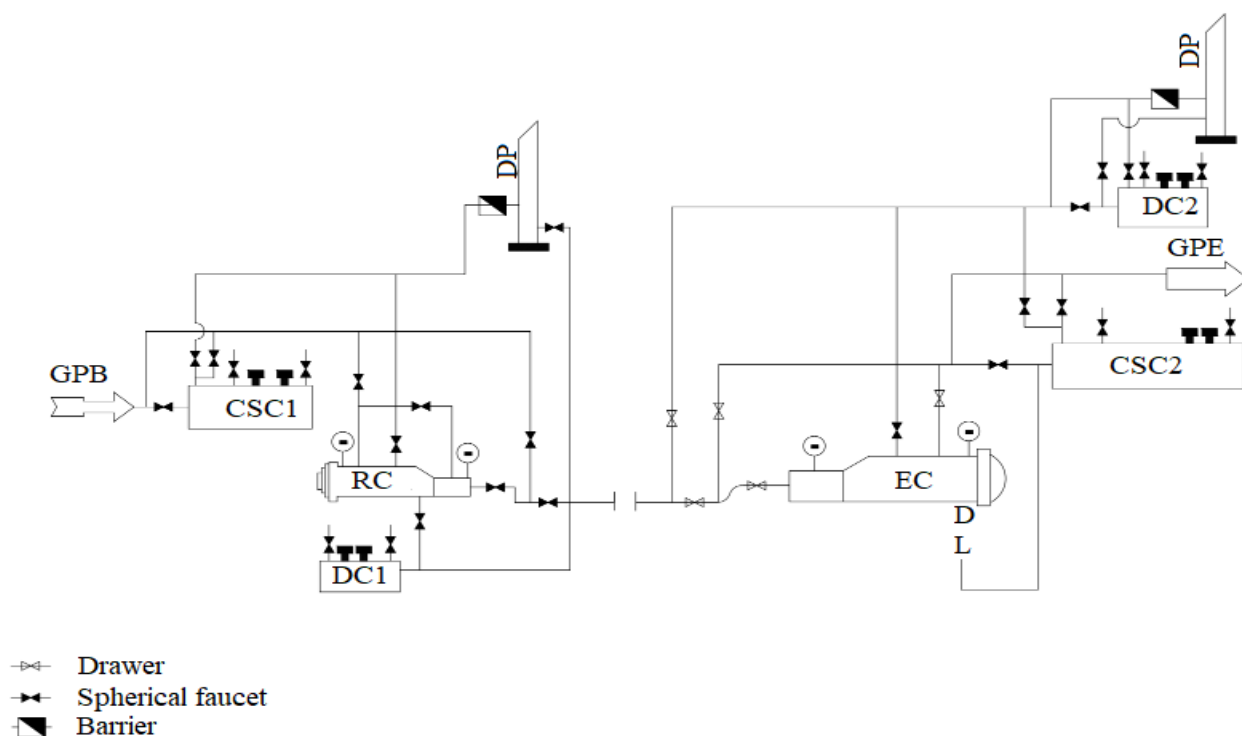


Figure 1 – The proposed technological scheme of the gas pipeline. GPB – the beginning of the gas pipeline; GPE - the end of the gas pipeline; CSC – condensate storage capacity; DC- drain capacity; RC - release chamber; EC - ersingabulu camera; DL - discharge line; DP – drilling pipe

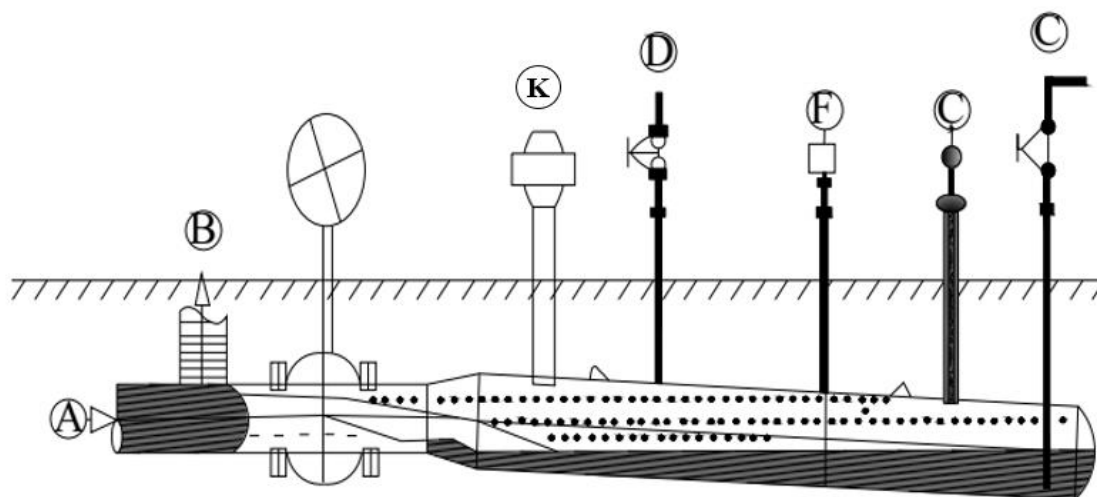


Figure 2 – The scheme of the capacitor. A – gas inlet; B – gas outlet; C – outlet of condensate (80 mm); Ç – reserve outlet of condensate (150 mm); D – reserve line (80 mm); F – output for the level indicator (80mm); K – protective valve for pressure relief of the tank

Discharge and intake chambers should be constructed after the condensate storage capacity at the beginning of the pipeline and before the condensate storage capacity at the end of the pipeline in order to remove accumulated condensate and mechanical particles in the interim segment. At various intervals, releasing the arse from the start should be done to clean the interior of the belt.

Figure 2 shows the diagram of the condenser capacity. In accordance with the requirements of the normative document "Safety rules for the operation of main gas pipelines", control-measuring devices, protective valves, appropriate connectors for emptying the capacity and removing condensate from the capacity are designed on the capacity. Due to gas pressure, condensate that has accumulated in the condensate storage capacity is collected and transferred to the prescribed location for disposal in a tank truck intended to transport oil products. Safety regulations as outlined in regulatory documents must be adhered to when collecting and transporting condensate from the tank.

The tank's condensate must be drained throughout the day and in the absence of wind.

Conclusion

Condensate collection capacities must be installed at the beginning and end of pipelines in order to separate and collect mechanical solids and condensate particles from the gas stream due to differences in kinetic energy from the gas flow in order to improve the quality indicators of the gas supplied to the consumer.

The belt is extended by adding a triple, followed by an elbow, in front of the tanks. This changes the direction of the gas flow to the condensate collecting tank, causing mechanical solid and condensate particles to be separated from the gas flow and thrown into the tank due to their differences.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. Mustafayev A.R., Abdullayev Ə.Ə., Pənahov R.Ə., Sultanov N.N., Qədəşova E.V. Qazların nəqlə hazırlanması. Bakı: Nafta-Press, 2015, 288 s.
2. Smirnov A.S., Shirkovskij A.I. Dobycha i transport gaza. - M.: Gostoptehizdat, 1957, 558 s.
3. Gurbanov A.N., Sardarova I.Z. Prospects of Using the Cavitation Technologies in Transportation. Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. Baku.2023. Vol.15. № 4. pp. 32-39. DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_04_32_39
4. Demkov V.P., Tremjakova O.N. Fizika. Teoriya. Metodika. Zadachi. – M.: Vysshaya shkola, 2001, 669c.
5. Bekirov T.M., Shamalov A.T. Sbor i podgotovka k transportu pripodnih gazov. - M.: Nedra, 1986, 261s.

UDC 622.27.621.52

DOI 10.52171/herald.295

Storage of Gas in Aquifers in Porous Media and Creation of Underground Gas Storage (UGS)

O.A. Aliyeva¹, A.S. Aliyev²

¹*Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)*

²*Research institute "Geotechnological Problems of oil, gas and Chemistry" (Baku, Azerbaijan)*

For correspondence:

Ofeliya Aliyeva /e-mail: aliyea.afeliya@inbox.ru

Abstract

The article shows planned solutions for creating underground gas reservoirs in a porous medium. Formulas for the volumes of produced and injected gas were obtained for each solution. As pressure values change, the volume of stored gas will also change. In this case, the pressure in the underground gas reservoir will vary from maximum to minimum depending on the operating conditions of surface equipment and the minimum permissible flow rate of the gas well. There are two types of underground gas storage in porous media: one is exhausted gas, and the other is gas storage in oil fields and aquifers. The article defines the difference between residual, active, buffer and maximum gas volumes in the design and operation of underground gas reservoirs. During the creation and operation of reservoirs underground gas is also determined by the difference between the maximum, minimum and average permissible pressure. At the same time, technological calculation of the gas tank consists of finding connections between the main indicators that correspond to the optimal, that is, the minimum reduced costs. All layers created in aquifers, as well as layers created on the basis of depleted oil and gas fields, characterized by water-pressure and elastic-pressure regimes, were also calculated taking into account the movement of formation waters.

Keywords: underground gas storage facilities (UGS), waste gas, buffer gas, gas volume, minimum and maximum pressure, compressor station (CS), reservoir pressure, porous medium.

Submitted 27 March 2024

Published 24 September 2025

For citation:

O.A. Aliyeva, A.S. Aliyev

[Storage of Gas in Aquifers in Porous Media and Creation of Underground Gas Storage (UGS)]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 62-68

Məsaməli mühitdə sulu təbəqələrdə qazın saxlanması və yeraltı qaz anbarının yaradılması

O.Ə. Əliyeva¹, Ə.S. Əliyev²

¹*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)*

²*Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və kimya ETİ (Bakı, Azərbaycan)*

Xülasə

Məqalədə məsaməli mühitdə yeraltı qaz anbarlarının yaradılmasının planlı şəkildə həlli yolları göstərilmişdir. Hər biri üçün çıxarılan və vurulan qazın həcmi düsturları çıxarılmışdır. Təzyiqlərin qiymətlərinin dəyişməsilə saxlanılan qazın həcm də dəyişəcəkdir. Eyni zamanda yeraltı qaz anbarında təzyiq yerüstü avadanlıqların iş şəraitindən və qaz quyusunun minimum icazə verilən debitindən asılı olaraq maksimumdan minimuma qədər dəyişir. Məqalədə yeraltı qaz anbarlarının layihələndirilməsi və istismarı zamanı qalıq, aktiv, bufer və maksimum qaz həcmələri arasındakı fərq müəyyənləşdirilir. Yeraltı qaz anbarlarının yaradılması və istismarı zamanı həm də icazə verilən maksimum, minimum və orta təzyiqlər arasında fərq təyin edilir. Eyni zamanda qaz anbarının texnoloji hesablanması optimal, yəni minimum azaldılmış xərclərə uyğun olan əsas göstəricilər arasındakı əlaqəni tapmaqdan ibarətdir. Həm də sulu laylarda yaradılan bütün anbarlar, eləcə də su-təzyiq və elastik-təzyiq rejimləri ilə səciyyələnən tükənmiş neft-qaz yataqları əsasında yaradılan anbarlar lay sularının hərəkəti nəzərə alınmaqla hesablanmışdır. Məsaməli mühitlərdə yaradılmış yeraltı qaz anbarları dövrü olaraq istismar olunan süni qaz yataqları hesab edilə bilər.

Açar sözlər: yeraltı qaz anbarları (YQA), tükənmiş qaz, aktiv qaz, bufer qazı, qaz həcmi, minimum və maksimum təzyiqlər, kompressor stansiyası (KS), lay təzyiqi, məsaməli mühit.

Хранение газа в водоносных горизонтах в пористых средах и создание подземных хранилищ газа (ПХГ)

О.А. Алиева¹, А.С. Алиев²

¹*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)*

²*НИИ Геотехнологические проблемы нефти, газа и химии (Баку, Азербайджан)*

Аннотация

В статье показаны планируемые решения по созданию подземных резервуаров газа в пористой среде. Для каждого раствора получены формулы объемов добытого и закачиваемого газа. При изменении значений давления меняется и объем хранимого газа. При этом давление в подземном газовом пласте будет изменяться от максимального до минимального в зависимости от условий работы наземного оборудования и минимально допустимого дебита газовой скважины. В статье определено различие между остаточным, активным, буферным и максимальным объемами газа при проектировании и эксплуатации подземных газовых резервуаров. При создании и эксплуатации резервуаров подземный газ определяется также разницей между максимальным, минимальным и средним допустимым давлением. Все пласты, созданные в водоносных горизонтах, а также пласты, созданные на базе истощенных месторождений нефти и газа, характеризующиеся водонапорным и упруго-напорным режимами, были рассчитаны с учетом движения пластовых вод.

Ключевые слова: подземные хранилища газа (ПХГ), отходящие газы, буферный газ, объем газа, минимальное и максимальное давление, компрессорная станция (КС), пластовое давление, пористая среда.

Giriş

Məqələdə yeraltı qaz anbarlarının layihələndirilməsi və istismarı zamanı qalıq, aktiv, bufer və maksimum qaz həcmələri arasında fərqi qoyulması məsələsinə baxılmışdır. Təhlil aşağıdakı kimi aparılır:

Qalıq - anbara vurulmağa başlamazdan əvvəl yataqda olan minimum qazın miqdarıdır.

Aktiv - hər il çıxarılan və vurulan qazın həcmi aşağıdakı düsturla müəyyən edilir:

$$Q_{\text{акт}} = \Omega \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{мин}}}{z_{\text{cp}} P_{\text{cm}}} \quad (1)$$

Burada Ω – məsamə sahəsinin həcmi; $P_{\text{мин}}$ və P_{max} - maksimum və minimum saxlama təzyiqi; P_{am} – atmosfer təzyiqi; z_{cp} - orta qazın supersıxılma əmsalidir.

Bufer - yeraltı qaz anbarından çıxarılmayan, lakin qazın səthə verilməsi üçün müəyyən minimum təzyiqin saxlanması, lay suyunun anbara daxil olmasının qarşısını almaq və s. üçün zəruri olan qazın həcmidir:

$$Q_{\text{буф}} = \Omega \frac{P_{\text{мин}}}{z_{\text{cp}} P_{\text{am}}} \quad (2)$$

Limit anbarda yerləşdirilə bilən qazın maksimum miqdarıdır:

$$Q_{\text{нед}} = \Omega \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{am}} z_{\text{cp}}} \quad (3)$$

Yeraltı qaz anbarlarının yaradılması və istismarı zamanı həm də icazə verilən maksimum, minimum və orta təzyiqlər arasında fərq qoyulur.

İşin məqsədi

Maksimum icazə verilən təzyiq, lay örtüyünün (damının) qorunub saxlanması şərti əsasında saxlama anbarında icazə verilə bilən ən yüksək təzyiqidir. Anbarın yaradıldığı layda təzyiq nə qədər yüksək olarsa, orada saxlanıla bilən qazın miqdarı bir o qədər çox

olar. Bununla belə, təzyiq həddindən artıq artarsa, rezervuarın damının sıxlığı pozula bilər və qazın yuxarıdakı təbəqələrə və ya səthə sızması üçün şərait yaradılacaqdır [1]. Bunun qarşısını almaq üçün layda icazə verilən maksimum təzyiqin üstə yerləşən süxurların təzyiqindən bir qədər az olduğu qəbul edilir (süxur təzyiqi):

$$P_{\text{max.дон}} \leq (0,6-0,7) P_{\text{сop}}. \quad (4)$$

Maksimum texniki-iqtisadi hesablamalar əsasında müəyyən edilmiş və qazın aktiv həcminə uyğun gələn təzyiqdir.

Minimum təzyiq texniki-iqtisadi hesablamalar əsasında müəyyən edilmiş və saxlanılan qazın bufer həcminə uyğun gələn təzyiqdir.

$$\frac{Q_{\text{буф}}}{Q_{\text{акт}}} = \frac{P_{\text{мин}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{мин}}} \quad (5)$$

Anbarda orta təzyiq ifadədən müəyyən edilir:

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t_0 dt) \quad (6)$$

burada T - bir ilə bərabər və ya bir ildən çox olan vaxtdır; t_0 – başlanğıc şərtidir.

Beləliklə, yeraltı anbarda təzyiq yerüstü avadanlıqların iş şəraitindən və qaz quyusunun minimum icazə verilən debitindən asılı olaraq maksimumdan minimuma qədər dəyişəcəkdir.

Belə qaz anbarlarının yaradılması və istismarı zamanı əsas çətinliklərdən biri dəyişən sıxılma nisbəti olan kompressorların istismarı zamanı böyük çəvikliyin təmin edilməsi zərurətidir. Tipik olaraq, qaz mühərriki pistonlu kompressorlar istifadə olunur. Müəyyən sayda kompressorlardan istifadə etmək tövsiyə olunur, onlar ardıcıl və ya paralel bağlana bilər [2].

Yeraltı qaz anbarının texnoloji layihəsi elə olmalıdır ki, anbara qazın vurulması və çıxarılması təmin edilsin. Bu zaman vurulan və çəkilən qazın tərkibinə, təzyiqinə və

temperaturuna dair zəruri tələblər yerinə yetirilməlidir.

İşin yerinə yetirilməsi

Yeraltı qaz anbarlarından birinin blok diaqramı Şəkilə göstərilmişdir. Qaz yatağının anbara çevrilməsi layihəsinin yaradılması üçün tələb olunan ilkin məlumatları iki qrupa bölmək olar. Birincisi, anbarın yaradıldığı obyektin xüsusiyyətləri (oroqrafiya, iqlim, geologiya) haqqında məlumatdır. İkincisi, yatağın işlənməsi zamanı istifadə olunan texnologiya və avadanlıqlar, eləcə də iqtisadi göstəricilər haqqında məlumatlardır [3].

Texnoloji məlumatlar dedikdə sözügedən yatağın işlənməsi, ilkin qaz ehtiyatları, qazın çıxarılması rejimi, təzyiq dinamikası, lay suyunun hərəkəti, quyuların suvarılması, yəni yatağın işlənməsinin təhlili və davranışın proqnozlaşdırılması üçün əsas olan göstəricilər aid edilir. Bu vəziyyətdə, depozit rejimini və onun üstündəki şın sıxlığının dərəcəsini qiymətləndirməyə imkan verən materiallara xüsusi diqqət yetirmək lazımdır [4].

Texniki məlumata yataqların işlənməsi sxemi, avadanlığın vəziyyəti, avadanlıq və qurğuların xüsusiyyətləri haqqında məlumatlar daxildir. Baxılan ərazidə qazılan quyuların bütün ehtiyatının yeri, dizaynı və xüsusilə texniki vəziyyəti haqqında materiallar ən böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Əgər tükənmiş neft və ya neft-qaz yatağı əsasında anbarın yaradılması nəzərdə tutulursa, o zaman neftin tərkibi, qalıq qaz, neft və su ilə doyma, qaz faktorları və digər miqdarlar haqqında məlumat almaq lazımdır. Anbarın yaradılması və istismarı zamanı yaranacaq qalıq neft və qazın qarşılıqlı təsirini filtrasiya proseslərini və mayenin faza davranışını qiymətləndirmək nöqtəyi-nəzərindən nəzərdən keçirmək olar [5].

İqtisadi məlumatlara baxılan rayonun qaz istehlakı rejimi, qazın dəyəri və onun qiyməti, arxa yanacağın dəyəri, bufer istehlakçılarının olması, istifadə olunan yanacağın növləri, qazma və quyuların tikintisi xərcləri və s. kapital qoyuluşlarının və məsrəflərin qaz anbarının müəyyən edildiyi göstəricilər, həmçinin qaza tələbatın mövsümi tərəddüdlərinin ödənilməsinin müxtəlif üsullarının müqayisəsinə əsaslanır.

Əgər böyük qaz istehlakçısının yaxınlığında asanlıqla anbara çevrilə bilən tükənmiş neft və qaz yataqları yoxdursa, qazın saxlanması üçün sulu qatlardan istifadə olunur. Bu halda layın kifayət qədər keçiriciliyi, məsaməliliyi, qalınlığı və elastiklik qabiliyyəti olmalıdır; qazın üst çöküntülərə nüfuz etməsinə mane olan sıx süxurlarla örtülməlidir. Layda tələnin də olması lazımdır (geoloji şəraitdə su ilə dəstəklənən qaz qabarcığının layda qeyri-məhdud müddət ərzində sabit vəziyyətdə qala biləcəyi).

Saxlama üçün qaz yuxarı qaldırılma tagında yerləşən quyular vasitəsilə təsvir olunan xüsusiyyətlərə malik olan sulu təbəqəyə vurulur. Bu halda təzyiq rezervuar təzyiqindən artıq olmalıdır. Qaz kollektorun məsamələrinə nüfuz edir və suyu oradan çıxarır, su ilə dəstəklənir, tələnin yuxarı hissəsini tutur. Quyuda təzyiq azaldıqda qaz səthə axır [6].

Anbar bir neçə ildir qazla doldurulur, buna görə də dövrü iş rejiminə keçməzdən əvvəl onun istismarına başlamaq, hər mövsümdə çəkiləndən bir qədər böyük həcmdə qaz vurmaq məsləhət görülür.

Qaz anbarının texnoloji hesablanması optimal, yəni minimum azaldılmış xərclərə uyğun olan əsas göstəricilər arasındakı əlaqəni tapmaqdan ibarətdir.

Bu göstəricilər aşağıdakılardır: sistemin əsas komponentlərində lay - quyu - hidravlik

sındırma stansiyası (HSS) - qaz kəməri və anbarın istismarı zamanı onun dəyişməsi; quyular üzrə qaz sərfi və anbarın istismarı zamanı onun dəyişməsi-qazın aktiv və bufer həcmələri; KS-nin gücü; -hazır kommunikasiyaların diametri və uzunluğu, yerüstü avadanlığın (kompresorlar, separatorlar, qaz qurutma qurğuları və s.) sxemi və əsas parametrləri; hasilat, müşahidə və müşahidə quyularının dibinin layihələndirilməsi, avadanlığı və s. [7].

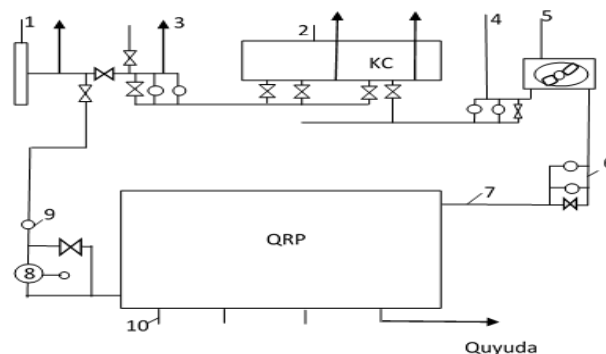
Bu göstəricilər aşağıdakılardır: sistemin əsas komponentlərində lay - quyu - hidravlik sındırma stansiyası (HSS) - qaz kəməri və anbarın istismarı zamanı onun dəyişməsi; quyular üzrə qaz sərfi və anbarın istismarı zamanı onun dəyişməsi-qazın aktiv və bufer həcmələri; KS-nin gücü; hazır kommunikasiyaların diametri və uzunluğu, yerüstü avadanlığın (kompresorlar, separatorlar, qaz qurutma qurğuları və s.) sxemi və əsas parametrləri; hasilat, müşahidə və müşahidə quyularının dibinin layihələndirilməsi və avadanlığı [8].

Qaz anbarının təşkili sxemləri xüsusi şərtlərdən asılı olaraq çox müxtəlifdir. Ümumiyyətlə, ən çox yayılmış halda, qaz təchizatı boru kəməri, kompressor stansiyası, qaz paylama məntəqəsi, şleyflərin radial sistemi, hasilat quyuları və anbar daxildir.

Yeraltı qaz anbarının təşkili, eləcə də tükənmiş layların istifadə zamanı orada quraşdırılmış avadanlığın xüsusiyyətləri köhnə avadanlıqların vəziyyətindən və obyektin geoloji və istismar şəraitindən asılıdır [9].

Saxlamanın təşkili diaqramına (şəkil) əsasən, magistral qaz kəməmindən 1 qaz təchizatı manifoldu vasitəsilə kompressor stansiyasına 2 daxil olur, əvvəllər skrubberlərdə 3 təmizlənir. Qaz kəmərinə təzyiq kifayət qədər yüksəkdirsə, kompressor

qaz vurularkən stansiyadan istifadə edilə bilməz. Sıxılmış isti qaz separatorlarda 4 neftdən təmizlənir, soyuducu qüllədə 5 soyudulur və neft separatorlarından 6 keçir.



Şəkil – Saxlama qurğusunun iş rejiminin müəyyən edilməsi

Figure – Determining the mode of operation of the storage device

Qazın təmizlənməsinə çox diqqət yetirilməlidir. Qazda toz, şkala və neft hissəciklərinin olması dib zonasının tıxanmasına və quyunun inyeksiya qabiliyyətinin azalmasına səbəb olur. Bunu nəzərə alaraq, sxemə tez-tez yağ ayırıcılarından əlavə, yağın tam çıxarılması üçün karbon adsorberləri və kömür tozunu tutan keramika filtrləri daxildir [10].

Kollektor 7 vasitəsilə təmizlənmiş qaz hidravlik qırılma üçün qaz paylama məntəqəsinə verilir, burada quyular arasında paylanır və debitometrlərlə ölçülür. Hidravlik sındırma qurğusu kompressor stansiyasının (KS) ərazisində və ondan əhəmiyyətli məsafədə yerləşə bilər [11].

Anbarda qaz paylama sistemi adətən radial şəkildə həyata keçirilir. Kompresorlar dayandırıldıqda qazın geri axmasının qarşısını almaq üçün yoxlama klapanları quraşdırılır

Qaz anbardan götürüldükdə birinci mərhələ separatoruna göndərilir, burada damcı su və bərk hissəciklər ayrılır, daha sonra qaz kəməri sisteminin təzyiqində işləyən ikinci

mərhələ separatoruna daxil olur. Bundan sonra qaz bir debitometrdən, yoxlama klapanından keçir və manifolda 10 daxil olur, qurutma qurğusuna 8 aparır. Quruduqdan sonra qaz axını ümumi debitometr 9 ilə ölçülür, sonra qaz təchizatı qaz kəmərinə daxil olur.

Sistemin aşağı təzyiqli hissəsində təzyiqin qəbuledilməz artması halında manifold 10-da təhlükəsizlik klapan quraşdırılır.

Hidrat formalaşması ilə mübarizə aparmaq üçün qaz yataqlarının istismarı zamanı olduğu kimi eyni tədbirlər görülür.

Qaz anbardan kompressor stansiya-sından istifadə edilərək götürülsə, təmizləndikdən və sıxıldıqdan sonra qurutma qurğusuna, sonra isə tədarük qaz kəmərinə verilir.

Sulu laylarda yaradılan bütün anbarları, eləcə də su-təzyiq və elastik-təzyiq rejimləri ilə səciyyələnən tükənmiş neft-qaz yataqları əsasında yaradılan anbarlar hətta su lay sularının hərəkəti nəzərə alınmaqla hesablanmalıdır [12].

Aktiv lay suları olan qaz anbarının dayanıqlı işləməsinin əsas şərti əlaqə ilə ifadə olunur:

$$p_{cp} - \frac{1}{T} \int_0^T p(t) d(t) = 0 \quad (7)$$

burada p_{cp} -laydakı təzyiqdir, qaz-su interfeysinə orta səviyyəsinə endirilir;

T bir ilə bərabərdir və ya bir ilin qatlarıdır.

(7) ifadəsinin mənası ondan ibarətdir ki, dövrüylərin sayının qatı olan bir müddət ərzində saxlama anbarında vaxtla çəkilmiş orta təzyiq qaz-su interfeysinə endirilən laydakı ilkin təzyiqə bərabər olmalıdır.

Nəticə

Beləliklə, əgər anbarda orta təzyiq daha yüksəkdirsə, zaman keçdikcə qaz lay suyunu itələyərək və tələdən kənara çıxı bilər. Orta təzyiq daha az olarsa, su tədricən bütün anbarı dolduracaqdır.

Məsələli laylarda yaradılmış yeraltı qaz anbarlarını dövrü olaraq istismar olunan süni qaz yataqları hesab etmək olar.

Saxlama anbarının tsiklik işinin hesablanması əsas texnoloji göstəricilərin - anbarda minimum p_{min} və maksimum p_{max} təzyiqinin, aktiv Q_{akm} və bufer $Q_{byf.}$ və həcmələrinin, maksimum Ω_{max} və minimum Ω_{min} müəyyən edilməsindən ibarətdir.

Səth strukturları sistemində maksimum təzyiqlərin dəyərlərini də müəyyən etmək lazımdır. Eyni zamanda məsələli mühitlərdə yeraltı qaz anbarlarının yaradılması lay sularının hərəkəti nəzərə alınmaqla hesablanmalıdır.

Maraqlar münaqişəsi

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

REFERENCES

1. **Ismayilov F.S., Abbasov E.M., Gadirov Z.S.** Determination of well operation mode at the initial stage of gas injection process to Garadagh underground gas storage, Azerbaijan Oil Economy, 2018, №12, pp.14-17
2. **Aslanov V.D.** Geological bases of creation of underground gas storages and relations with the solution of gas supply problems, Baku, 2001, pp.43-49
3. **Aliyeva O.A., Aliyev A.S.** Modeling of cyclic geomechanical impact on the carbonate reservoir Collection of materials of the V International scientific and practical conferences, Achievements, problems and development prospects oil and gas industry, Volume 1, State Budget Educational Institution of Higher Education "Almetyevskiy State Oil institute" 2020, № 12, pp. 9-13
4. **Mustafayev S.D., Aliyeva O.A., Aliyev A.S.** Influence of the movement of heel water collected in the water trap on the working mode of underground gas storages, "Azerbaijan Oil Economy" 2019, №8, pp.19-21
5. Website of JSC "Gazprom" - URL: <http://www.gazprom.ru> (Date of Appeal 10.03.2020)
6. **Aliyeva O.A., Aliyev A.S.** Calculation of the Flow Rate of a Gas Dynamically Imperfect Production Well According to the Degree of Formation Penetration in Underground Gas Storages (UGS). Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, Vol 15, №2, 2023, p.59-63,
7. **Akhundova N.R., Rzazade S.A., Aliyeva O.A., Bahshaliyeva S.O.** Compression of liquids from the perating wells to the surface applying the sequential approximation, today we finally received the third review for your article. The review is positive, so the article will be published Nafta-gaz. 10.18668/NG.2023.03.04,2023, no. 3, pp. 184-189, <https://www.inig.pl/en/nafta-gaz-en/abstracts>
8. **Salavatov T.S., Ismayilov. F.S., Bayramov B.A.** Technology of oil extraction by wells, Baku, 2012, pp.60-67
9. **Aliyeva O.A.** About the need to create underground gas storage facilities hodja Akhmet yassawı17. International Congress on Scientific Research Mingachevir State University, Azerbaijan, February 24-25, Congress Program, 2023, №2, pp.262-266.
10. **Aliyeva O.A.** Inequality of gas consumption and methods of their regulation, 8th international icontech congress on innovative surveys in positive sciences viii international. icontech conference on innovative surveys in positive sciences proceedings book march 16-18, Azerbaijan Cooperation University, Baku, 2024, pp.280-283. ISBN: 978-625-8254, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9071-5154>
11. **Aliyeva O.A.** Inequality of gas consumption and methods of their regulation 8th International Icontech congeress on Innovative Surveys in Positive Sciences Azerbaijan Cooperation University, mart16-18, Congress program 2024, pp. 222-225.
12. **Aliyeva O.A., Aliyev A.S.** Qaz anbarlarında geoloji-fiziki şəraitlərin öyrənilməsi məqsədilə laboratoriya eksperimental və mədən tədqiqatlarının aparılması. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. 2024, C.16, №1, s. 70-78.

UDC 622.83

DOI 10.52171/herald.297

Study of the Processes of Destruction of Rocks under the Action of Hydrodynamic Pressure

Kh.E. Aliyarova

Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Khalida Aliyarova / e-mail: aliyarova1976@bk.ru

Abstract

The purpose of using hydro-mechanization in the mining industry is to ensure the crushing of large parts of the rock mass and solid phase to sizes suitable for hydraulic transportation conditions. This process requires the creation of sufficient pressure in the water flow. Therefore, the required pressure and water flow rate must be determined in advance. For this purpose, various mathematical models were analyzed to determine the parameters, relevant research studies were studied, and the most realistic ones were selected from the results. Practical calculations were carried out to determine the parameters, and graphs were drawn up based on the results. The results obtained allow determining the pressure and flow rate required to crush the rock to the required size.

Keywords: mountain range, hydraulic transport, hydraulic monitor, pressure, speed, water jet.

Submitted 30 October 2024

Published 24 September 2025

For citation:

Kh.E. Aliyarova

[Study of the Processes of Destruction of Rocks under the Action of Hydro-dynamic Pressure]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 69-74

Hidrodinamik təzyiqin təsiri altında süxurların dağılması proseslərinin öyrənilməsi

X.E. Əliyeva

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Dağ-mədən sənayesində hidromexanizasiyadan istifadənin məqsədi süxur kütləsinin və bərk fazanın iri hissələrinin hidravlik daşınma şəraitinə uyğun ölçülərə qədər əzilməsini təmin etməkdir. Bu prosesdə su axınında kifayət qədər təzyiqin yaradılması tələb olunur. Buna görə də, tələb olunan təzyiq və su axınının sürəti əvvəlcədən müəyyən edilməlidir. Bu məqsədlə, parametrlərin təyin olunması üçün müxtəlif riyazi modellər təhlil edilmiş, müvafiq tədqiqat işləri öyrənilmiş və nəticələrdən ən real olanları seçilmişdir. Parametrlərin müəyyən edilməsi üçün praktiki hesablamalar aparılmış və nəticələr əsasında qrafiklər tərtib edilmişdir. Alınan nəticələr süxurun lazımı ölçüdə əzilməsi üçün tələb olunan təzyiq və axın sürətini müəyyən etməyə imkan verir.

Açar sözlər: dağ silsiləsi, hidravlik nəqliyyat, hidromonitor, təzyiq, sürət, su axını.

Исследование процессов разрушения горных пород под действием гидродинамического давления

Х.Э. Алиева

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(Баку, Азербайджан)

Аннотация

Целью применения гидромеханизации в горнодобывающей промышленности является обеспечение дробления крупных частей горной массы и твердой фазы до размеров, пригодных для условий гидравлического транспортирования. Для этого процесса необходимо создать достаточное давление в потоке воды. Поэтому необходимо заранее определить необходимое давление и расход воды. Для этого были проанализированы различные математические модели для определения параметров, изучены соответствующие научные исследования и по результатам выбраны наиболее реалистичные. Для определения параметров были проведены практические расчеты, по результатам которых построены графики. Полученные результаты позволяют определить давление и расход, необходимые для дробления горной породы до требуемых размеров.

Ключевые слова: горный массив, гидротранспорт, гидромонитор, давление, скорость, водная струя.

Введение

Целью гидромеханизации является создание давления водного потока, необходимого для измельчения габаритных частей горной массы и твёрдой фазы до размеров, соответствующих требованиям гидравлического транспорта. Это осуществляется с помощью различных устройств, таких как гидромониторы.

По своему составу поток, создаваемый гидромонитором, состоит из трёх зон. В первой зоне поток обладает высокой плотностью и значительным динамическим давлением. Вследствие резкого изменения давления в водяном потоке происходит отделение пузырьков воздуха. Вторая зона представляет собой смесь пузырьков жидкости и воздуха. В третьей зоне поток состоит из отдельных фрагментированных струй и мелких капель воды, движущихся в воздушной среде.

Водный поток условно делится на три участка:

1. Участок формирования струи – расположен непосредственно у сопла гидромонитора. Здесь поток воды ещё сохраняет компактность, имеет наибольшую плотность и высокое динамическое давление. На этом этапе энергия потока максимальна, и он способен разрушать прочные породы.

2. Участок распада струи – на этом участке вследствие взаимодействия с воздухом и внутренних турбулентных процессов струя начинает распадаться. Вода смешивается с воздухом, образуются пузырьки, и наблюдается частичное снижение плотности потока. Давление уменьшается, но сохраняется достаточная кинетическая энергия для выполнения технологических задач.

3. Участок диспергирования – струя окончательно распадается на капли различного размера и фрагменты. Поток

приобретает аэрозольный характер и теряет способность к активному разрушению. Однако даже на этом этапе он может быть полезен, например, для орошения или промывки.

Такое деление водяного потока позволяет более точно рассчитывать эффективность гидромониторной струи на различных расстояниях и корректировать параметры работы оборудования в зависимости от поставленных задач.

Длина рабочей части потока зависит от конструкции гидромонитора и обычно составляет 350 – 450 диаметров насадки [1].

Чтобы усилить поток воды в каналах гидромонитора, им придают максимально гладкую и округлую форму. Для улучшения формирования струи и её гидромеханических характеристик в гидромониторах используются специальные стабилизирующие устройства (рис. 1).

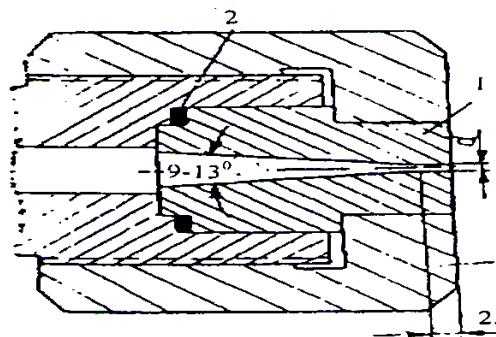


Рисунок 1 – Наконечник с одинарным вырезом и его уплотнение в гнезде: 1 - успокаивающий наконечник, 2 - уплотнение, 3 - зажимная гайка
Figure 1 – Single-notch tip and its seal in the socket: 1 - soothing tip, 2 - seal, 3 - clamping nut

Применение таких стабилизаторов позволяет значительно увеличить динамическое давление потока. Наконечник форсунки гидромонитора обеспечивает полное формирование водяного потока (табл. 1).

Оптимальная конструкция струйного наконечника способствует увеличению осевого динамического давления на 14 %.

Когда напряжение в определённой точке горной породы превышает предел её упругости, происходит деградация породы [2].

Таблица 1 – Размеры наконечников форсунок
Table 1 – Dimensions of injector tips

Диаметр наконечника, мм	Конический угол, гр.	Длина цилиндрической части, мм	Общая длина диаметра струи, мм
185	10,5	320	730
140	8,5	310	718
150	7,2	300	700
160	6,0	295	682
165	5,7	290	645
175	5,0	285	575

Постановка задачи

По мнению специалистов, при малых скоростях потока промывка невозможна. По мере увеличения скорости потока до определённого оптимального значения интенсивность промывки сначала возрастает, а затем изменения становятся незначительными.

Механизм промывки объясняется следующим образом: под действием контактных сил происходит смешивание слоёв горных пород, после чего они оmyваются водой [3]. Поток воды разрушает поверхность горной породы; вода, проникая в поры, воздействует на внутреннюю структуру, особенно в местах соприкосновения потока с дном. В результате разрушается внутренняя структура породы и изменяются её физические свойства. Затем порода дополнительно оmyвается поступающей струёй воды [5].

При расчете процесса выщелачивания был разработан метод расчета фильтрационного потока в породе вблизи точки воздействия потока гидромонитора.

Для определения контактного усилия в массиве горных пород, обусловленного сопротивлением отрыву его частиц с во-

дой, имеем формулу:

$$\frac{\tau}{\gamma} = Ri$$

где τ – тактильное напряжение, кг / см²; γ – объемная масса воды, кг / м³; R – гидравлический радиус, м; i – гидравлический уклон.

Во время наблюдения за процессом разрушения горных пород под воздействием давления потока выявлено, что при сильном ударе породы подвергаются следующим воздействиям: *механическое разрушение под действием динамических нагрузок; гидродинамическое разрушение вследствие компрессионного потока; влияние контактных напряжений; напряжения, вызванные насыщением породы водой.*

Также возможно растворение солей, содержащихся в породе.

Решение задачи

На эффективность промывки оказывают большое влияние физико-механические свойства горных пород: коэффициент фильтрации, петрографический и гранулометрический состав, пористость, пластичность, влажность и коэффициент сцепления. Глины с малым коэффициентом фильтрации и близкородственные частицы обладают значительным сопротивлением водопоглощению в массив и относительно слабо смываются водой, при этом эффект промывки очень незначителен. Разрушение глинистых пород зависит от пористости, пластичности и силы сцепления [6].

Установлено, что при промывке песчаников эффективность промывки увеличивается с ростом их влажности и пористости, а также с уменьшением размера частиц. На рис. 2 приведён график зависимости удельного расхода воды, расхода и удельного давления для пород с различными коэффициентами сцепления.

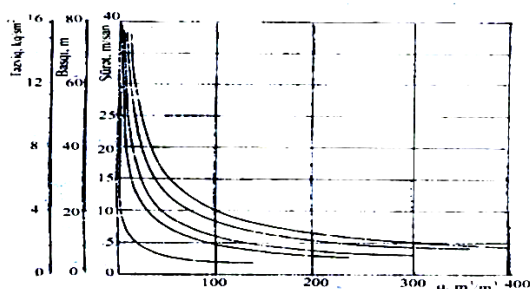


Рисунок 2 – Удельный расход воды на попутные породы, давление и расход полета зависимость скорости

Figure 2 – Specific water consumption for associated rocks, pressure and flow rate dependence of flight speed

В табл. 2 приведен расход воды на промывку 1 м³ горных пород с разным показателем сцепления.

Таблица 2 – Влияние силы сцепления на удельный расход воды

Table 2 – Effect of adhesion force on specific water consumption

Названия минералов	Цена сцепления, кг / см²	Расход воды на 1 м³ породы, м³ / м³
Суглинки	0,351	5-10
Глины	0,385	10-12
Маслянистые глины	0,441	14-20

От качества проведенных организационных работ и правильного расположения гидромонитора на месте уступа зависит эффективность разрушения горных пород в массиве. На основании устойчивости откоса при промывании пород и данных эксперимента профессор Г.А. Нурок [4] предложил следующие формулы для определения глубины котлована в уступе.

Для пород с высокой силой сцепления:

$$\alpha = \frac{8c^2l}{6H\gamma_2} - \frac{H}{2} \operatorname{ctg} \alpha$$

Только для горных пород, создающих трения и силы сцепления:

$$\alpha = \frac{1}{2bH} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha + \varphi}{2} - \operatorname{ctg} \alpha \right) (lH_k^2 - bH^2)$$

Здесь $H_k = \frac{2c}{\gamma} \frac{\cos \varphi}{\sin (45 - \frac{\varphi}{2})}$; c - коэффициент

сцепления горных пород; φ - угол внутреннего трения горных пород, H - высота ступеньки; γ - объемный вес горных пород; δ - ширина режущего фронта; угол устойчивости α -склона; l - единичная длина плоскости скольжения.

Промывки песка с образованием прозрачной полости не наблюдается. Следовательно, при низком потреблении энергии возможное влияние потока приводит к нарушению структуры массива. При гидравлической переработке угля подземным способом сначала образуется трещина (полость), а затем появляются полосы, параллельные трещине [7,8].

От твердости угля, размера и назначения выработки зависит размер ямы. Процесс разрушения угля под давлением потока воды происходит следующим образом:

1. В зоне соприкосновения потока с угольной массой возникают растягивающие и тактильные напряжения, вызывающие образование слабых трещин.

2. Вода проникает в образовавшиеся трещины, и затем уголь разрушается под воздействием гидростатического давления и износа.

3. В зависимости от строения угольного пласта наблюдаются различные особенности процесса разрушения.

4. Промывка мягких углей осуществляется при давлении 20–25 атм.

5. В углях средней твердости ($f=2$) дно выработки разбирают для создания конической глубины, а перед промывкой уголь размягчают продувкой.

6. Разрушение треснувшего угля происходит за счет гидростатического воздействия воды, поглощенной породным слоем. Этот процесс называется гидро-разрывом пласта. Разрушение угля гидравлическим клином экспериментально доказано: интенсивность обрушения угля зависит не только от начального давления,

но и от типа открытых, закрытых и связанных трещин в нем.

7. Разрушение горных пород начинается с первоначального размягчения и дробления материала в месте контакта струи с породой. Трещины в массиве вызывают уплотнение раздробленных пород.

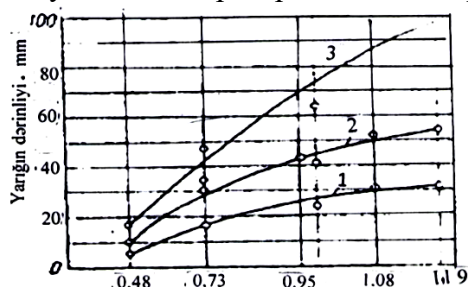


Рисунок 3 – Вывод наконечника глубины пропила материала: 1 – поперечная зависимость гранит, 2 – мрамор; 3 – известняк

Figure 3 – Output of the tip of the cutting depth of the material: 1 – transverse dependence granite, 2 – marble; 3 – limestone

Согласно мнению специалистов, применение технологии «гидравлического клина» условно разделяет процесс на два этапа: этап бурения и этап скольжения.

По данной формуле определяется давление в центре потока при схлопывании угля.

$$P_m = \frac{2\tau}{8.5 + \mu - 2\sqrt{15 + 6\mu}}$$

Здесь P_m - давление в центре потока; μ -

коэффициент Пуассона; τ - предел упругости скольжения образца.

Рассчитанная по данной формуле величина разрушающей нагрузки составляет 60–80 % от временного сопротивления угля. Был проведён ряд специальных исследований разрушения горных пород тонкой струёй при давлении 2000 атм. Диаметр наконечника составлял 0,48–1,19 мм, угол конуса 9–13 градусов. На рисунке 3 показаны общий вид такого наконечника и зависимость глубины отверстия от диаметра наконечника.

Закключение

Была предложена более точная математическая модель давления водяной струи и расчёта скорости её полёта, позволяющая измельчать породы горного массива до требуемых размеров. На основе данной модели произведены расчёты и построены графики зависимости дальности струи, давления, скорости полёта и удельного расхода воды.

Конфликт интересов

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

REFERENCES

1. Buyanov Yu.D., Krasnopol'skij A.F. Razrabotka mestorozhdenij nerudnyh poleznyh iskopaemyh. M, Nedra, 1980, 430 s.
2. Ismailov R. T. Processy otkrytyh gornyh rabot. - Baku, -2010, -278 s.
3. Azizov A.M., Afandiyeva Z.Ch. Osnovy gornogo dela (uchebnik). Baku, 2010, 278 s.
4. Nurok G.A. Gidromekhanizatsiya gornyh rabot. M.: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po gornomu delu, 1959.
5. Kameney P.N. Gidroelevatory v stroitel'stve. M, 1964.
6. Zhabin A.B., Polyakov A.V., Hachaturyan V.G. Vliyanie gidravlicheskih parametrov strui vody na pokazateli processa shcheleobrazovaniya pri rezanii goryuchih slancev. Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle, 2016. Vyp.2.
7. Brenner V.A., Zhabin A.B., Shchegolevskij M.M., Polyakov A.V., Polyakov A.V. Sovershenstvovanie gidrostrujnyh tekhnologij v gornom proizvodstve. M. 2010.
8. Eminov R.A., Mamedova S.B., Aliyarova Kh.E. Povyshenie tochnosti ocenki prosadki grunta dlya bezopasnogo funkcionirovaniya truboprovodov// Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, Baku, 2025, vol.17(1), pp. 51 – 57.

UDC 541; 678; 046.3

DOI 10.52171/herald.298

Comparative Analysis of Composites Based on Corresponding Natural Minerals and their Strength

**V.J. Jafarov, M.A. Manafov, N.R. Bektashi, N.A. Alimirzaeva,
S.M. Khalilova, S.A. Salahova, G.H. Musaeva**

*Institute of Polymer Materials, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan
(Sumgait, Azerbaijan)*

For correspondence:

Valeh Jafarov / e-mail: valeh_ani@mail.ru

Abstract

The article provides a comparative analysis of the degree of strength (tensile strength) of composites based on fillers of various compositions. In this direction, research was conducted and results were obtained taking into account a number of filler characteristics. The corresponding fillers were brought from different places and made suitable for laboratory testing. As a result of comparing the ultimate tensile strength values, it was determined which filler is more suitable and superior to others. The fillers are based on natural mineral rocks, clays, etc., brought from several regions of Azerbaijan. The value of the results directly depends on the dispersion of the filler, the relief structure of the area, the mineralogical wealth of the extracted sources and a number of factors.

Keywords: natural mineral rock, clay, filler, tensile strength (σ), elongation at break (ϵ), melt field strength (MFS).

Submitted 31 October 2024

Published 24 September 2025

For citation:

V.J. Jafarov, M.A. Manafov, N.R. Bektashi, N.A. Alimirzaeva,
S.M. Khalilova, S.A. Salahova, G.H. Musaeva

[Comparative Analysis of Composites Based on Corresponding Natural Minerals and their Strength]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 75-81

Müvafiq təbii minerallar əsasında kompozitlər və onların möhkəmlik dərəcəsinin müqayisəli təhlili

V.C. Cəfərov, M.Ə. Mənəfov, N.R. Bektəşi, N.Ə. Əlimirzəyeva,

S.M. Xəlilova, S.Ə. Salahova, G.H. Musayeva

Polimer Materialları İnstitutu, Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi (Sumqayıt, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə müxtəlif tərkibli doldurucular əsasında alınan kompozitlərin möhkəmlik dərəcəsinin (dartma qüvvəsi) müqayisəli təhlili verilmişdir. Bu yönümdə tədqiqat aparılaraq doldurucunun bir sıra xüsusiyyətləri nəzərə alınaraq nəticələr əldə edilmişdir. Ayrı-ayrı ərazilərdən gətirilərək laboratoriya şəraitində tədqiqata yararlı hala salınaraq müvafiq doldurucular istifadə edilmişdir. Dartımda möhkəmlik həddinin qiymətlərinin müqayisəsi nəticəsində hansı doldurucunun daha münasib və üstün olduğu müəyyən edilmişdir. Doldurucuların əsasını Azərbaycanın bir sıra regionlarından gətirilmiş təbii mineral süxurlar, gillər və s. təşkil edir. Nəticələrin yüksəkliyi doldurucunun dispersliyi, gətirildiyi ərazinin relyef strukturu, çıxarıldığı mənbələrin mineraloji zənginliyi və bir sıra amillərdən bilavasitə asılıdır.

Açar sözlər: təbii mineral süxur, gil, doldurucu, dartımda möhkəmlik həddi (σ), qırılma zamanı nisbi uzanma (ϵ), ərintinin axıcılıq göstəricisi (ΘAG).

Сравнительный анализ композитов на основе соответствующих природных минералов и степени их прочности

В.Дж. Джафаров, М.А. Манафов, Н.Р. Бекташи, Н.А. Алимирзаева,

С.М. Халилова, С.А. Салахова, Г.Г. Мусаева

Институт полимерных материалов, Министерство науки и образования Азербайджанской Республики (Сумгаит, Азербайджан)

Аннотация

В статье приведен сравнительный анализ степени прочности (предела прочности) композитов на основе наполнителей различного состава. В этом направлении были проведены исследования и получены результаты с учетом ряда характеристик наполнителя. Соответствующие наполнители были привезены из разных мест для исследования в лабораторных условиях. В результате сравнения предельных значений предела прочности на разрыв было определено, какой наполнитель более подходит и превосходит другие. В основе наполнителей лежат природные минеральные породы, глины и т.п., привезенные из нескольких регионов Азербайджана. Показатели напрямую зависят от дисперсности заполнителя, рельефного строения местности, минералогического богатства добываемых источников и ряда факторов.

Ключевые слова: природная минеральная порода, глина, наполнитель, предел прочности при растяжении (σ), относительное удлинение при разрыве (ϵ), предел текучести расплава (ПТР).

Introduction

One of the priority directions of modern chemical science is the production of new materials with different compositions and properties based on polymers and their additives. In the production of any polymer composite and in the creation of a new material with higher properties, the influence of the nature, structure and properties of the binder added to the initial polymer is considered to be one of the important factors. Thus, the binder taken must have a number of properties, for example; adhesion, adsorption for aqueous solutions, dispersibility, compatibility enhancing, etc.

It is known from a number of literatures that fillers have different sizes, changes due to the influence of the stabilizing medium, surface activity, and hardness in nature. Such additives are diverse and rich in variety in terms of structure and size, distribution on the polymer surface and impact strength.

A number of American scientists have worked on polymers using small-sized clays as fillers as linking agents. Immediately after the adoption of nanotechnology programs in the USA (2000) and other developed countries, scientists moved from studying polymer composites and heterogeneous mixtures to creating various types of devices based on them. Currently, light-emitting diodes, solar cells, memory devices, gas sensors, catalysts and other devices have been developed based on polymer composites and nanoheterogeneous mixtures [1].

Currently, interest in composite materials based on polymer matrices and nanosized metal particles has increased significantly. This is due to the fact that their application spectrum is quite wide - they can be used in various fields, from catalysis to

modern information technology, as well as in various fields of chemistry, physics, and materials science.

The development of scientific research on the study of nanoscale metal particles stabilized in polymer matrices has led to the development of metal-polymer composite materials with many specific physical, mechanical and operational properties. Such materials have properties such as high thermal and electrical conductivity, magnetization ability, and shielding of ionizing radiation.

The use of solid particles of various shapes and chemical nature as fillers in polymeric materials opens up new possibilities for the modification of these materials, since small-sized substances are distinguished by their unusual adsorption activity due to their large surface area and high surface energy. Therefore, in composite materials containing small-sized particles, there is a high adhesion strength between the polymer matrix and these particles [2].

There is extensive information from many sources that the introduction of additives into polymer-elastomer systems has a positive effect on the formation of such a structure and the properties. One of the main factors affecting the impact strength and brittleness temperature of a heterophase polymer-elastomer system is its phase structure - the volume fraction of components, the average size of the dispersed phase particles, the size distribution of particles, the nature of their distribution in the mixture and the characteristics of the rubber (molecular mass, strength, elastic modulus, glass transition temperature, etc.). It is shown that the main condition for achieving high viscosity of the dispersion is the homogeneous distribution of the elastomer phase in the form of small

dispersed particles in a continuous matrix phase [3, 4].

Metal-containing polymer-sorbents were synthesized as a result of modification of phosphochlorinated polybutadiene with dithizone. The sorption properties of the obtained polymer-sorbents were studied with respect to gold (III) ion in solution. It was found that the degree of sorption of gold in an acidic medium is 85-95% [5].

By functionalizing multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) with various functional polymers (copolymers of maleic anhydride with octene-1 and nonene-1 monomers), CdS, CuS and SnS nanostructures were synthesized and studied using modern analysis methods. Different time intervals of ultrasonic treatment were used to obtain samples [6].

A polymer hydrogel with a memory effect was synthesized based on polyacrylic acid and poly-N-vinylpyrrolidone. Silver nanoparticles were synthesized in a poly-N-pyrrolidone medium, and nanocomposites were obtained from its complex with doxorubicin, and their sorption capacity was studied. It was found that the obtained hydrogels have a high sorption capacity. It is shown that using polymers of this type, the therapeutic dose of doxorubicin for experimental treatment of oncological diseases can be significantly reduced [7].

Nanocomposites of nickel, cobalt and misulfide based on polymers were synthesized by ion layering and sonochemistry methods. The optimal conditions for the synthesis of nanocomposites (equilibrium concentration of reagents, temperature, reaction time, pH, etc.) were determined by sorption processes. It was found that the distribution of ions on the surface is a heterogeneous process and both

physical and chemical adsorptions occur simultaneously [8].

Considering the effect of small-sized fillers on polymers and the positive properties of the new material obtained, research was conducted using various natural mineral rocks ground to a micron-sized dispersion level as fillers and positive results were obtained.

Selection and use of fillers to obtain a material with strength properties and low cost; Selection and use of plasticizers, dressings and other purposeful components to simplify technological processes and improve operational properties; Adjustment of friction and antifriction properties; Introduction of additional components to adjust thermal and electrical conductivity; Addition of appropriate flame retardants to increase resistance to combustion; Presence of fungicidal, bactericidal and other properties to increase resistance to microorganisms; Possession of antistatic properties, etc. [9].

Problem statement

Scientific research conducted on the development of composites and filling them with additives to improve a number of their properties is sufficient in number, and the successes achieved in this way are undeniable. For many years, the issue of introducing additives into composites and obtaining positive results has been solved in various scientific research laboratories. Fillers are diverse both in terms of structure and properties. There is a sufficient amount of work with existing fillers in solid and liquid form, and the results are many [10]. Polymers processed with fillers, which are modifying agents that play a coordinating role in obtaining composites with complex

operational properties of a new generation, are considered suitable materials [11].

Taking all this into account, a comparative analysis of the physical and mechanical properties of composite samples obtained from different areas with different fillers in terms of their dispersion degree and structural characteristics was carried out. At the same time, the issue of the presence of a finish in the system was also taken into account. The comparative analysis helped us to obtain positive results by taking into account the ratio and the unit of measure of the dispersion of the filler taken.

Solution

Laboratory staff crushed various fillers using appropriate methods, sieved and ground

them, achieved micron-sized dispersion, and used them to obtain samples for research. The fillers are natural mineral rocks and clays with sizes of 53 and 106 μm , respectively. In order to improve the compatibility between the polymer matrix and the filler and to achieve higher properties of the obtained sample, sizing agents synthesized in laboratory conditions were included in the polymer-filler type system [12].

Results and their discussion

As a result of the research conducted over several years, the values of the tensile strength of composite samples obtained based on fillers of various compositions are reflected in the table 1. We present a list of fillers taken for the study.

Table 1 – Strength index of composite samples with different fillers

Row	Filler, in %	Matrix, in %	Apprete, in %	Tensile strength, %, σ , MP
1.	Vezuviane-80	PE-20	-	37.4
2.	Bokside-60	PE-40	-	12.8
3.	Kaoline-60	PE-40	(MA+ED-20)-5	15.3
4.	Goydash-60	PE-40	(MA+Hep.1+Acr.ac.)-1/2/1	14.1
5.	Seolite-60	PE-40	(MA+Hep.1+Acr.ac.)-1/1/1	17.8
6.	Alunite-60	PE-40	-	15.3
7.	Silisium gelium-70	PE-30	K salt -3	19
8.	Perlite-70	PE-30	-	15.1
9.	Gadabay dep. clay-70	PE-30	(Hep.1+Acr.ac.)-2/1	16.9
10.	Zakhmatkand-70	PE-30	(Hep.1+Acr.ac.)-1/2	15.4
11.	Keramsite-70	PE-30	-	14.9
12.	Artesian clay-70	PE-30	(MA+Hex.1)-3	15.9
13.	Volcanic mud -70	PE-30	(Hep.1+Acr.ac.)-2/1	13.7
14.	Tursh Su-60	PE-40	(Hek.1+Acr.ac.)-2/1	17.2

Table 2 – Results of research conducted with polyethylene processing

Row	Filler, in %	Matrix, in %	Apprete, in %	Tensile strength, %, σ , MP
1.	Dashkesan ore -70	PPE-30	(Hex.1+Acr.ac.)-2/1	16.7
2.	Bentonite-60	PPE-40	(MA+Hep.1)-1/1	15.8
3.	α -kvars-70	PPE-30	-	31
4.	Tovus clay -60	PPE-40	Polimetakrylate-3	18.8

Table 3 – Results of research conducted with polypropylene (without apprete)

Row	Filler, in %	Matrix, in %	Tensile strength, %, σ , MP
1.	Mining waste -40	PP-60	33.6
2.	Gisil Zod-30	PP-70	30.6
3.	Damirchi Dam-50	PP-50	32.3
4.	Vulcanic ash -30	PP-70	38

A ranking is presented according to the variety of fillers taken depending on the type of each polymer matrix. Thus, separate presentations are given for polyethylene, processed polyethylene and polypropylene. The aim is to determine which is the most complete result.

The tables 1-3 show the strength of polymer composite samples treated with various fillers corresponding to 53 and 106 μm . The higher tensile strength of the sample treated with each filler was taken. An analysis is presented in accordance with the principle of obtaining a higher result in samples corresponding to which mass ratio in polymer/filler and polymer/filler/size systems corresponding to different mass ratios.

High-pressure polyethylene (HPPE) or low-density polyethylene (ASPE), its derivatives and polypropylene (PP) were taken as the matrix. Separate copolymers synthesized in laboratory conditions were taken as the size. Obtaining samples with higher tensile strength depends on the dispersity, environment, nature, and degree of compatibility with the polymer of each filler taken.

When looking at the tables 1-3, it is determined that the maximum strength is $\sigma=38$ MPa in the sample without filler, corresponding to the ratio of volcanic ash-30 and matrix-70 mass%. In this case, polypropylene

is present in the system as a matrix. This result is explained not only by the properties of the filler but also by the high degree of crystallinity of polypropylene. Polypropylene differs from other polyolefins due to its high degree of crystallinity and its more appropriate stereoregular structure. Of the composites obtained using processed polyethylene as a matrix, the one with the most superior physical and mechanical properties is the composite obtained based on Tovuz clay as a filler and polymethacrylate as a filler. In this case, the tensile strength is 18.8 MPa.

When looking at other indicators, it is observed that the tensile strength limit of the composite sample based on 80 mass % vesuvian and 20 mass % polyethylene taken as filler has a higher $\sigma=37.4$ MPa. Based on this result, it can be said that the nature and compatibility of the filler is superior to other binders.

In addition, with a number of fillers, for example: “Mining Waste”, “Gyzil Zod”, “Demirchi Dam”, “Tovuz Gili”, “Tursh Su” the result (strength limit) gets higher values.

Thus, when giving a final opinion on the results, it is observed that the polymer matrix in composites with high tensile strength limit is polypropylene.

Conclusion

As a result of the analytical study, a comparative presentation of the strength of composites created over the years based on various fillers and finishes is given. The highest result obtained with each filler is taken. It was determined that the value of the tensile strength limit is the highest in the composite sample corresponding to the PP/Volcanic ash-70/30 mass % ratio ($\sigma=38$ MPa). It was determined that the maximum

value of the tensile strength limit corresponds to the case where polypropylene is used as the polymer matrix, directly depends on various properties of polypropylene, such as its stereoregular structure, crystallinity, melting and solidification temperature. In a number of studies, although the physical and mechanical properties increase with the introduction of a filler into the system, the regularity is relatively violated when polypropylene plays the role of a matrix.

When composites are obtained using polyethylene as a matrix, the maximum

physical and mechanical performance corresponds to the sample in which the filler is taken in the amount of 60% by mass. In this case, when IPE/Filler-40/60%, the tensile strength reaches a maximum value of 18.8 MPa. The desired results were obtained in the research-based scientific research work and the work was fully evaluated.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. Michaylin Y.A. Polymernie nanokompozitsionnye materialy, Polymernie materialy, Moskva, 2009, №7, s.10-13.
2. Əlimirzəyeva N.Ə. İzotaktik polipropilen və metaltərkibli nanodoldurucular əsasında termoplastik elastomer kompozitlərin alınması və tədqiqi, Kimya üzrə fəlsəfə doktorluğu dissertasiyası, 2021, Sumqayıt, s. 24-24.
3. Jayraman K., Kolli V.G., Kang S.Y. [et al.] Shear flow behavior and oil distribution between phases in TPV, J. Appl. Polym. Sci., New York, 2004. Vol. 93, pp.113-121.
4. Karger-Kocsis J., Shonaike G.O., Simon G.P. Polymer Blends and Alloys, Ed. by New York, Marcel Dekker, 1999, pp.125-140.
5. Yaqubova Ü.İ. Divinil sintetik kauçuku əsasında sorbentlərin alınması və onların Au³ sorbsiya xassələrinin tədqiqi, kimya üzrə fəlsəfə doktoru diss. avtoreferatı, Sumqayıt, 2016, s. 20.
6. Məlikov E.Y. Malein anhidridi birgə polimerləri və polivinil spirti ilə karbon nanoboruların funksionallaşdırılması və alınan nanoquruluşların tədqiqi, kimya üzrə fəlsəfə doktoru dis. avtoreferatı, Sumqayıt, 2016, s. 25.
7. Məmmədova S.M. Doksorubisinin immobilizə olunması üçün polimer gellərin sintezi və tədqiqi, kimya üzrə fəlsəfə doktoru dis. avtoreferatı, Sumqayıt, 2017, s. 25.
8. Balayeva O.O. Polimer matrisdə nikel, kobalt, mis sulfidləri əsasında nanokompozitlərin sintezi və onların modifikasiyası. Kimya üzrə fəlsəfə doktoru diss. avtoreferatı, Bakı, 2017, 25s.
9. Alxanov P.Ş., Bektaş S.A., Musayeva G.H., Mənzəfov M.Ə., Rəcəbova M.C., Xəlilova S.M., Cəfərov V.C. Poliakrilatın polietilen kompozisiyalarının xassələrinə təsiri, Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı, 2021, cild 13, №4, s. 86-99.
10. Cəfərov V.C., Alxanov P.Ş., Mənzəfov M.Ə., Bektaş S.A., Xəlilova S.M., Musayeva G.H. İonomer quruluşlu appretin polimer kompozisiyalarda rolu. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı, 2024, cild 16, №1, s. 95-100.
11. Alimirzayeva N.A. The effect of metal-containing nanoparticles on the thermo-oxidative properties of thermoplastics elastomers based on isotactic polypropylene and ethylene propylene diene rubber, New Materials, Compounds and Applications, 2022, Vol.6, No.3, pp. 220-229.
12. Jafarov V.J., Alimirzayeva N.A., Musaeva G.H., Manafov M.A., Khalilova S.M., Rajabova M.J. Production of new generation composite materials based on high-density polyethylene and “Artesian Clay” and the effect of appret, Sumqayıt Dövlət Universiteti: “Elmi Xəbərlər”. Təbiət və texniki elmlər bölməsi, 2024, cild 24, №3, s. 31-36.

UDC 541.128.13, 542.943.7, 541.183

DOI 10.52171/herald.299

Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metals Oxides

I.H. Malikova, A.J. Efendi, N.F. Aykan, H.M. Farajov, F.A. Yunisova

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after academician M. Nagiyev of the Ministry of Education of the Republic of Azerbaijan (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

İrada Malikova / e-mail: iradam@rambler.ru

Abstract

One of the main solutions to prevent air pollution is the reduction of CO by oxidation to CO₂. Although it has been known since the beginning of the 20th century that some oxides show significant activity, recently, due to the increase in the price of noble metals and special advances in oxide synthesis, the catalytic oxidation of carbon monoxide over oxide catalysts has gained interest. In this article, the kinetics and mechanism of CO oxidation in simple and mixed oxides, as well as the structures of the catalysts, are investigated.

Keywords: carbon monoxide, heterogeneous catalysis, reaction mechanism, transition metals.

Submitted 11 February 2025

Published 24 September 2025

For citation:

I.H. Malikova, A.J. Efendi, N.F. Aykan, H.M. Farajov, F.A. Yunisova
[Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metals Oxides]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 82-90

Karbon monoksidin keçid metallarının oksidləri üzərində katalitik oksidləşməsi

İ.H. Məlikova, A.C. Əfəndi, N.F. Aykan, H.M. Fərəcov, F.Ə. Yunisova

Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin akademik M.Nağıyev adına Kataliz və Qeyri-üzvi Kimya İnstitutu (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Havanın çirklənməsinin qarşısının alınmasının əsas həlli yollarından biri CO-nun CO₂-yə oksidləşməsidir. 20-ci əsrin əvvəllərindən bəzi oksidlərin nəzərəcarpacaq dərəcədə aktivlik göstərməsi məlum olsa da, son vaxtlar nəcib metalların qiymətinin artmasına və oksid sintezindəki xüsusi irəliləyişlərə görə karbonmonoksidin oksid katalizatorlar üzərində katalitik oksidləşməsi maraq qazanmışdır. Bu məqalədə katalizatorların quruluşları ilə yanaşı sadə və qarışıq oksidlərdə CO-nun oksidləşməsinin kinetikasi və mexanizmi araşdırılmışdır.

Açar sözlər: karbon monoksid, heterogen kataliz, reaksiya mexanizmi, keçid metallar.

Каталитическое окисление оксида углерода над оксидами переходных металлов

И.Г. Меликова, А.Д. Эфенди, Н.Ф. Айкан, Г.М. Фараджев, Ф.А. Юнисова

Институт катализа и неорганической химии им. академика М. Нагиева Национальной академии наук Азербайджана (Баку, Азербайджан)

Аннотация

Окисление до CO₂ является основным решением проблемы снижения выбросов CO при очистке воздуха от загрязнений. Из-за роста цен на благородные металлы и значительного прогресса в синтезе оксидов в последнее время возрос интерес к каталитическому окислению монооксида углерода над оксидными катализаторами, даже если известно, что некоторые оксиды проявляют заметную активность с начала 20 века. В статье рассмотрены кинетика и механизм окисления CO на простых и смешанных оксидах, а также структуры катализаторов.

Ключевые слова: оксид углерода, гетерогенный катализ, механизмы реакции, переходные металлы.

Giriş

Karbon monoksid ərimə temperaturu – 205.02°C , qaynama temperaturu – 191.5°C olan rəngsiz iysiz qazdır. Hemoqlobinə olan hərisliyinə görə insan və heyvan orqanizmləri üçün çox toksikidir. Bu qaza maksimal məruz qalma müddəti 8 saatda 25 ppm-dən və ya 4 saatda 50 ppm-dən çox olmamalıdır, halbuki getdikcə dəm qazının bu həddi keçən zərərli təsirləri, hətta qazın 650-700 ppm öldürücü qatılığında müşahidə olunur [1-4], qatılığın bu qiyməti 1 Mpa qiymətinə qədər ümumi təzyiqdən az dərəcədə asılıdır [3]. Dünyada böyük miqdarda dəm qazı (2000-ci ildə 1.09 milyard ton), əsasən nəqliyyat, elektrik stansiyaları, sənaye və məişət fəaliyyətləri nəticəsində ətraf mühitə atılır [5–7].

Karbonmonoksid, həm də ciddi tənəffüs problemlərinə səbəb olan yerin ozon təbəqəsinin vəziyyəti haqqında məlumat verir. Bu qaz suda çox da yaxşı həll olmur ($23\text{mL}_{\text{CO(g)}} \text{L}^{-1}_{\text{H}_2\text{O(l)}}$ və ya $0.026\text{g}_{\text{CO(g)}} \text{L}^{-1}_{\text{H}_2\text{O(l)}}$), bu da onun maye işləmədən keçərək havadan ayrılmasını məhdudlaşdırır.

Bütün bu səbəblər, CO-nun CO_2 -yə oksidləşməsi yolu ilə azaldılmasını havanın çirklənməsinin qarşısının alınmasında əsas həll yoluna çevirir. Karbonmonoksid də çox tez alışan qazdır; onun havada yanması 12 ilə 75% arasında baş verə bilər [8]. Lakin əksər hallarda havanın çirklənməsinə səbəb olan qaz qarışıqlarında CO-nun qatılığı daha aşağı olur, adətən 50-50 000 ppm diapazonunda olur ki, bu da CO-nun homogen yanmasının faktiki olaraq qeyri-mümkün olması deməkdir. CO-nun azaldılmasına nail olmaq üçün onun oksidləşməsini katalizator iştirakında aparmaq lazımdır. Katalizatorun rollarından biri onun səthində tullantı maddəsinin qatılaşdırılmasıdır ki, bu da oksidləşmə reaksiyasının kifayət qədər sürətlə getməsinə imkan verir.

20-ci əsrin əvvəllərindən başlayaraq, hopkalit kimi bəzi oksidlərin ətraf mühit temperaturunda CO-ni oksidləşdirdiyi məlumdur. Hopkalit ikili amorf Mn-Cu oksididir, onun səthinin quruluşunu CaO , Al_2O_3 və ya bentonit gili əlavə edərək sabitləşdirmək mümkündür.

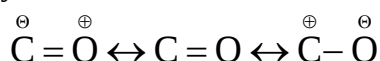
Qeyd etmək lazımdır ki, alınmış katalizator nümunələrinin aktivlikliyini sənayedə (CuO , ZnO , CaO , Cr_2O_3) və ya avtomobil nəqliyyat vasitələrində Pt (ABŞ) tətbiq olunan katalizator nümunələri ilə müqayisə etsək görürük ki, bizim aldığımız katalizatorların iştirakında karbon monooksidin çevrilməsində Pt (ABŞ) katalizatorları ilə eyni səviyyədə aktivlik göstərir. Baxmayaraq ki, sənaye katalizatoru propanın 100% çevrilməsini çox yüksək temperaturda 933 K-də təmin edə bilər. Temperaturun isə belə proseslərdə 200–400K aşağı salınması külli miqdarda enerjiyə qənaət etmək deməkdir. 1990-cı illərdə Avropada katalitik çeviricilərin inkişafı CO-nun oksidləşməsində istifadə olunan nəcib metalların (Pt, Pd, Rh) yüksək aktivliyini [9] və yüksək oksigen toplanma rejiminə (OTR) malik oksidlərin xüsusi rolunu vurğulayaraq, metalın dövrü şəraitdə davamlı işləməsinə imkan vermişdir [10]. Bununla belə, nəcib metalların qiyməti artdığı üçün və oksid sintezində nəzərəcərpacaq irəliləyişlərə görə karbon monoksidin oksid katalizatorları üzərində katalitik oksidləşməsi son vaxtlar böyük maraq kəsb etmişdir. Bundan əlavə, CO-nun oksidləşməsi oksid səthinin xarakteristikası üçün maraqlı bir tədqiqat reaksiyası hesab edilə bilər.

Burada bizim əsas məqsədimiz bu mövzuya həsr olunmuş son ədəbiyyat materiallarını nəzərdən keçirməkdir. Metallar üzərində CO-nun oksidləşməsi həm makroskopik səviyyədə, həm də molekulyar

miqyasda ədəbiyyatlarda təfərrüatlı şəkildə tədqiq edildiyi üçün, sadə və qarışıq oksid katalizatorları üzərində reaksiyanı tədqiq etməmişdən əvvəl metallar üzərində ən çox ehtimal olunan mexanizmlər qısaca nəzərdən keçirilmişdir [11, 12].

Metal Katalizatorlar üzərində CO-nun oksidləşməsi

Metallar üzərində karbon monoksid və oksigenin xemosorbsiyası. Karbon monoksid üç rezonanslı quruluşa malik molekuldur, bu da onun unikal adsorbsiya xassələrini və bu molekulun oksid və metal səthləri üzərində reaktivliyini izah edir:



Sol tərəfdəki quruluş, karbon və hər bir atomdakı elektron cütü ilə yaranan mənfi yük çox üstünlüyə malikdir. Blyholder ilk müəllifdir ki, 1800–2200 cm^{-1} tezlik intervalında müxtəlif vibrasiya infraqırmızı spektrlərini izah edərək, CO-nun metallar üzərində xemosorbsiyasının elektron modelini təklif etmişdir. CO əsasən C-də yerləşən 5s-orbitalı vasitəsilə s-elektron donoru kimi və dağıdıcı $2\pi^*$ -orbitalı vasitəsilə p-elektron akseptoru kimi çıxış edir. CO bir (xətti quruluş) və ya bir neçə metal atomu (körpü quruluşu) ilə koordinasiya edə bilər. Sheppard və Nguyenə görə, CO-nun adsorbsiya zolaqlarının beş spektral aralığından danışmaq olar:

- $\nu_{\text{CO}} = 1700\text{--}1800 \text{ cm}^{-1}$; 4 metal atomu ilə rabitə yaratmış CO;

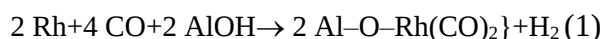
- $\nu_{\text{CO}} = 1800\text{--}1920 \text{ cm}^{-1}$; 3 metal atomu ilə rabitə yaratmış CO;

- $\nu_{\text{CO}} = 1860\text{--}2000 \text{ cm}^{-1}$; 2 metal atomu ilə rabitə yaratmış CO;

- $\nu_{\text{CO}} = 2000\text{--}2130 \text{ cm}^{-1}$; xətti adsorbsiya olunmuş molekullar;

- $\nu_{\text{CO}} = 2130\text{--}2200 \text{ cm}^{-1}$; metal ionları ilə rabitə yaratmış CO.

Müəyyən bir metal üçün IR zolaqlarının dəqiq mövqeyi metal sahəsinin təbiətindən və hissəcik ölçüsündən asılıdır. Məsələn, Brandt və b. CO-nun Pt/SiO₂ üzərində 2067 cm^{-1} (Pt-nin uc nöqtələrində izolə olunmuş CO molekullarına aid), 2080 cm^{-1} (Pt(100) üzərindəki CO molekullarının sahələrinə və ya kənar uclardakı CO molekullarının qruplarına aid) və 2088 cm^{-1} -ə uyğun (Pt(111) səthində CO molekullarının sahələrinə aid) üç ν_{CO} vibrasiya zolağının yaranması qənaətinə gəlmişdir. Rodium həmçinin iki CO molekulunun bir RhI mərkəzi ilə koordinasiya olduğu gem-dikarbonil molekullarının alınmasına səbəb ola bilər. Bu rejim 2052 cm^{-1} -də CO xətti zolağının hər iki tərəfində iki IR zolağı (2095 cm^{-1} -də simmetrik və 2027 cm^{-1} -də antisimmetrik) yaradır. Bu gem-dikarbonil zolaqları əsasən kiçik daşıyıcı Rh klasterlərində ortaya çıxır. Belə maraqlı xüsusiyyət (Rh CO-nun kimyəvi sorbsiyası hesabına oksidləşə bilər) bir çox müəllifləri bu hadisəyə inandırıcı izahat tapmağa sövq etdi. Bəzi müəlliflər belə bir fikir irəli sürdülər ki, Rh çox kiçik klasterlər şəklində olduqda əvvəlcədən oksidləşə bilər. Primit belə nəticəyə gəldi ki, CO, dissosiasiyadan alınan O atomu vasitəsi ilə Rh-nun korrelyativ oksidləşməsi ilə xemosorbsiya zamanı dissosiasiya edə bilər. Bir çox digər müəlliflərə görə, Rh-nun oksidləşməsi CO molekulunu və daşıyıcının OH qrupları arasında baş verən kooperativ reaksiyadan meydana çıxır:



Gem-dikarbonil zolaqlarının artması, sonuncu izahı dəstəkləyən ν_{OH} zolağının azalması ilə paralel baş verə bilər. Bununla

belə, mühitdə qarışıq fazalı Rh^0/Rh^{n+} -in olması Rh^0 üzərində gem-dikarbonil molekullarının alınmasına da səbəb olur. Bu katalizatorlarda rodium sadəcə qismən əvvəlcədən oksidləşir və daşıyıcı (alüminium oksid) ilə sabitləşən rodium oksidi reduksiya olunmuş metal fazanın elektron xüsusiyyətlərini dəyişdirə bilir. Bir qayda olaraq, karbon monoksid çox faydalı bir IR tədqiqat molekuludur; o, metalların dispersiya və reduksiya

halları, eləcə də təsirə məruz qalan səthlərin təbiəti haqqında məlumat verə bilər. Palladium katalizatorları da kimyəvi adsorbsiya olunmuş CO-nun çox sayda FTIR spektrlərinin analizinin olması baxımından parlaq bir nümunədir.

Kiçik bir sahədə və ya sıfıra ekstrapolyasiya edilmiş sahədə CO-nun kimyəvi sorbsiyasının təcrübi alınmış istilik qiymətləri cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1 – Metallar üzərində CO-nun (Q_{CO} – kCmol^{-1} ilə) kimyəvi adsorbsiya istiliklərinin qiyməti. Qiymətlər ən aşağı oblasta və ya sıfır oblastına ekstrapolyasiya edilmişdir

Table 1 – Values of chemical adsorption heats of CO (in Q_{CO} – kCmol^{-1}) on metals. The values are extrapolated to the lowest region or zero region

Metal (tərəf)	İstinad [7,8]	İstinad [8,9]	İstinad [10,11]	İstinad [12]
Pt(111)	138	126	135	190
Pt(100)	134	–	–	220
Pt(110)	109	109	119	–
Rh(111)	130	130	132	–
Rh(100)	121	–	125	117
Rh(110)	–	130	–	–
Pd(111)	142	142	153	–
Pd(100)	153	–	–	170
Pd(110)	168	168	167	–
Ir(111)	142	126	185	–
Ir(100)	147	–	–	–
Ir(110)	155	147	–	–
Ni(111)	–	111	122	131
Ni(100)	–	–	117	123
Ni(110)	–	126	115	133
Ru(111)	122	122	131	–
Ru(110)	109	–	–	–
Co(111)	–	103	–	–
Cu(111)	–	–	51	–

Bu məlumatlardan mühüm nəticələr çıxarmaq olar:

• Aşağıda verilmiş sıraya uyğun olaraq, platin, rodium və rutheniumun xemosorbsiya istilikləri metal səthinin sıxlığından asılı olaraq artır: (111)>(100)>(110).

• Aşağıda verilmiş sıra (111) tərəfləri üzərində xemosorbsiya istiliklərini ifadə edir:

$Pd, Ir > Pt > Rh > Ru, Ni > Co >> Cu$ (1)

• Ümumiyyətlə, xemosorbsiya istilikləri səthin CO ilə örtülməsi θ_{CO} ilə azalır. Platin bu θ_{CO} -dən asılılığa ən həssas olan metal kimi

özünü aparır. Bradford və Vannice xemosorbsiya istiliyini Q_{ad} aşağıdakı sadə tənliklə ifadə etmişdir:

$$Q_{ad} = D_0(CO) = D_{C-O} = \eta D_{M-C} \quad (2)$$

Burada, $D_0(CO)$ qaz fazada CO molekulunun rabitə dissosiasiya enerjisi ($1071 \text{ kC} \cdot \text{mol}^{-1}$), D_{C-O} adsorbsiya olunmuş CO-nun rabitə dissosiasiya enerjisi, D_{M-C} hər bir metal-karbon rabitələrinin rabitə dissosiasiya enerjisi və η adsorbsiya koordinasiya ədədidir (yəni, M-C rabitələrinin sayı). D_{C-O} və D_{M-C} uyğun vibrasiyanın qüvvə sabitinin k müəyyən funksiyalarıdır və aşağıdakı kimi hesablanır:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (3)$$

burada, μ – ikiatomlu molekulun azaldılmış kütləsidir (sistemin fiziki parametrlərindən və onun hərəkət qanunundan asılı olaraq hərəkət edən mexaniki və ya qarışıq sistemdə kütlələrin paylanması şərti xarakteristikası). Bradford və Vannice 30 ikiatomlu molekulun ədəbiyyat məlumatlarından D – və k – arasında istənilən ikiatomlu vibratora uyğun ümumi əlaqə vermişdilər.

Bu $D=k$ ifadəsindən vibrasiya spektrlərinə görə dissosiasiya enerjisinin qiymətlərini təcrübi olaraq hesablamaq və (2) tənliyinə əsasən adsorbsiya istiliklərini qiymətləndirmək üçün istifadə edilmişdir. Bir qayda olaraq, istiliyin təcrübi qiymətləri və istiliyin (2) tənliyinə əsasən tapılmış qiymətləri, Pt üçün alınan qiymətlər istisna olmaqla, koherentdir. Tənlik (2)-yə əsasən hesablanmış istiliyin qiyməti Pt metalı üçün mənfi ədəd verir. Adsorbsiya istiliklərinin təcrübi və hesablanmış qiymətləri arasındakı bu böyük uyğunsuzluq CO-nun xemosorbsiyasından sonra platin səthinin ciddi dərəcədə yenidən formalaşması ilə əlaqədar ola bilər. Tənlik (2)-də D_{M-M} -nin sabit olduğu fərz

edilir, lakin səthin yenidən formalaşması baş verdikdə bu sabitlik pozulur.

Cədvəl 1-dəki qiymətlər King və həmkarları tərəfindən Ni, Pt və Pd metalları ilə, Smedh və b. tərəfindən Rh metalı ilə təcrübi olaraq təsdiq edilmişdir.

Adsorbsiya istiliklərinin təcrübi qiymətləri (cədvəl 1) sıxlıq funksional nəzəriyyəsi (DFT) ilə müəyyən edilən nəzəri assosiativ xemosorbsiya enerjiləri ilə uyğundur. Metalların fcc (211) səthi üçün Bligaard və b. nəzəri olaraq aşağıdakı qiymətləri almışlar ($\text{kC} \cdot \text{mol}^{-1}$ ilə): Pt 182; Rh 173; Pd 168; Ir 189; Ni 160; Ru 171; Cu 60; Au 34. CO-nun mis və qızıl üzərində zəif adsorbsiya olduğu DFT hesablamaları ilə təsdiq edilmişdir. Adsorbsiya istiliklərinin təcrübi (kalorimetrik tədqiqatlarla) və nəzəri qiymətlərinin mükəmməl uyğunluğu metal səthlərdə ən müasir DFT hesablamalarından istifadə etməklə təsdiqlənmişdi.

Bianchi və əməkdaşları Pd/Al₂O₃, Rh/Al₂O₃, Pt/Al₂O₃, Pt/ ZrO₂, və Cu/Al₂O₃ üzərində CO ilə örtülən sahəni ölçmək üçün FTIR spektroskopiyasından istifadə etmişdilər. Adsorbsiya temperaturunun təsiri ilə IQ zolaqlarının intensivliyinin dəyişməsi (xətti, körpü və Pt üçün üçqat koordinasiya olunmuş CO) adsorbsiya olmuş digər müxtəlif molekulların CO təbəqəsinin dəyişməsinə nəzarət etmək üçün istifadə edilmişdir. Bu, bəzi müəliflərə artmaqda olan təbəqədə hər bir molekulun kimyəvi adsorbsiya istiliyini hesablamağa imkan verdi (Cədvəl 2). Bütün məlumatlar təsdiq etmişdir ki, CO molekullarının təbiətindən asılı olmayaraq, adsorbsiya istilikləri CO təbəqəsinin artması ilə azalır. Lakin fərqli molekullarda Q_{CO} əhəmiyyətli dərəcədə dəyişə bilər. Pd və Cu katalizatorları maraqlı xüsusiyyətlər göstərir; CO-nun xətti molekulları Pt və Rh ilə daha güclü birləşdiyi halda,

Pd və Cu üçün əksini müşahidə etmək olar. Mis metalı isə nəcib metallardan fərqlənir. Belə qəbul edilir ki, bu metal heç vaxt alüminium oksiddə tamamilə reduksiya olunmur. 2120 cm^{-1} -də müşahidə olunan ikinci xətti zolağı Cu^+ hissəcikləri üzərində adsorbsiya olmuş CO-ya aid edilə bilər. CO bu

ionlu mis sahələrində daha güclü adsorbsiya olunur (sıfır oblastında $Q=115 \text{ kC}\cdot\text{mol}^{-1}$ və bütün oblastda $58 \text{ kC}\cdot\text{mol}^{-1}$). Buna baxmayaraq, körpü koordinasiyalı molekulların sayı mis üzərində çox azdır və onlar yalnız katalizatorun dezaktivləşməsindən sonra görünür.

Cədvəl 2 – CO ilə səth örtülməsi (θ_{CO}) ilə müqayisədə xətti və çoxrabitəli CO-nun (kCmol^{-1} -də Q_{CO}) kimyəvi adsorbsiya istiliklərinin qiyməti

Table 2 – Values of chemical adsorption heats of linear and polyvalent CO (kCmol^{-1} in Q_{CO}) compared to CO surface coverage (θ_{CO})

CO molekulları	Pt		Rh		Pd		Cu	
	θ_{CO}	Q_{CO}	θ_{CO}	Q_{CO}	θ_{CO}	Q_{CO}	θ_{CO}	Q_{CO}
Xətti (L)[a]	0	206	0	195	0	92	0	82
	1	115	1	103	1	54	1	57
Körpü (B)[b]	0	94	0	125	0	168	0	130
	1	45	1	75	1	92	1	78
Üçqat koordi- nasiyalı (3FC)[c]	0	135	–	–	–	–	–	–
	1	104	–	–	–	–	–	–
[a] L $\nu=2075$ (Pt), 2065 (Rh), 2072 (Pd), 2092 sm^{-1} (Cu); [b] B $\nu=1878$, 1835, 1824 (Pt), 1981 (Rh), 1980, 1942 (Pd), 2003 sm^{-1} (Cu); [c] 3FC $\nu=1800 \text{ sm}^{-1}$ (Pt).								

Oksidləşdirici katalizin kinetik modelində CO ilə səth örtülməsindən asılı olaraq kimyəvi adsorbsiyanın xeyli dərəcədə dəyişməsi nəzərə alınmalıdır. Ümumi halda aşağıdakı xətti asılılıq istifadə edilir:

$$Q_{\text{CO}} = -\Delta H_{\text{CO}} = a - b\theta_{\text{CO}} \quad (4)$$

Məsələn, bir sıra müəlliflərin [9, 10] və bizim işlərimizdə [11] təqdim olunan qiymətlərə uyğun olaraq polikristal Pt üzərində etanın oksidləşməsinin kinetik modelləşdirilməsində 82 sadə mərhələdən aşağıdakı asılılıq alınmışdır:

$$Q_{\text{CO}} = 146 - 33 \theta_{\text{CO}} \quad (5)$$

Ümumiyyətlə, Q_{CO} və θ_{CO} arasındakı xətti asılılıq nəcib metallar üçün istifadə edilə bilər. lakin onların əmsalları digər qazların iştirak etməsindən xeyli dərəcədə asılı ola bilər. Mühitdə başqa molekulların CO-nun adsorbsiyasının gücünə tormozlayıcı təsiri nəzərə alınarsa, ümumi xətti tənlik çox vaxt (6) ifadəsi kimi təklif olunur:

$$Q_{\text{CO}} = -\Delta H_{\text{CO}} = a - b \theta_{\text{CO}} - c \theta_{\text{X}} \quad (6)$$

burada, X CO ilə birgə adsorbsiya olunmuş qazdır. Əksinə, bir çox hallarda CO-nun iştirakı birgə adsorbsiya olunmuş molekulların adsorbsiya istiliyini azaldır.

CO-nun sadə oksid katalizatorlar üzərində oksidləşməsi. Çox istifadə olunan metal oksid katalizatorları üzərində CO-nun oksidləşməsinə həsr edilmiş ədəbiyyat materialları iki fərqli dövrə bölünə bilər: a) 1975-80-ci ilə qədər tədqiqatçıların bu istiqamətdəki marağı – nəcib metal katalizatorlarının avtomobillərintullantı qazlarının katalitik işlənməsindəki üstünlüyü qəbul edilməzdən əvvəl; b) son zamanlardakı stasionar tətbiqlər [uçucu üzvi birləşmənin (VOC) azaldılması] və nəcib metalların daha ucuz katalizatorlarla əvəz edilməsi üçün belə oksid katalizatorlarına olan marağın olduğu dövr.

Cədvəl 3-də Heck və Farrauto [10]-a əsasən 300°C-də CO oksidləşməsi üçün nəcib metalların və çox istifadə olunan metalların nisbi aktivlikləri göstərilmişdir. Sonuncular nəcib metallardan daha passivdir.

Cədvəl 3 – 300°C-də nəcib metalların və çox işlənən metalların oksid katalizatorlarının nisbi aktivliyi

Table 3 – The Relative activities of oxide catalysts of noble metals and the much-used metals at 300°C

Aktiv faza	Nisbi aktivlik	Aktiv faza	Nisbi aktivlik
Pd	500	Au	15
Pt	100	MnO ₂	4.4
Co ₂ O ₃	80	Fe ₂ O ₃	0.4
CuO	45	Cr ₂ O ₃	0.03
CuO/Cr ₂ O ₃	40	NiO	0.013
LaCoO	3 35		
Reaksiya şəraiti: O ₂ artığında 1% CO			

Bununla belə, bəzi oksidlər, xüsusən Co və Cu oksidləri CO oksidləşməsində özünü maraqlı aparır. Onların katalitik təsiredici qabiliyyətlərinin azalmasının əsas səbəbi dövrü qeyri-stasionar şəraitdə arzuolunmaz davranışları və kükürd və suyun təsiri ilə deaktivləşməyə yüksək həssaslıqlarıdır. Yanacaqlarda

kükürdün miqdarının çox azalması və oksid katalizatorlarının sintezində irəliləyiş çox bilinən metal oksidlərinin praktik tətbiqlər üçün yenidən nəzərdən keçirilməsinə imkan verdi. Bizim tərəfimizdən aparılan hərtərəfli tədqiqatlar nəcib metaldan azad katalizatorların çox yüksək aktivlik göstərdiyini təsdiqlədi [11]. CO oksidləşməsində kobalt və mis oksidlərinin çox yaxşı göstəricilərini nəzərə alaraq, burada icmalın əsas hissəsi bu materiallara həsr edilmişdir.

Bütün lazımi hesablamalar “Optim Me” proqram paketindən istifadə etməklə aparılmışdır [12].

Nəticə

Dəm qazının katalitik oksidləşməsi iki əsas səbəbə görə geniş şəkildə tədqiq edilmişdir: a) CO toksik molekuludur və avtomobil tullantı qazlarından və stasionar mənbələrdən kənar edilməlidir; b) CO-nun oksidləşməsi yeni materialların katalitik aktivliyini qiymətləndirmək üçün geniş istifadə olunan sadə reaksiyadır. 1960–1970-ci illərdə nəcib metallardan ibarət katalitik təsiredicilərin inkişafı metal katalizatorlar, xüsusilə Pt, Pd və Rh haqqında kütləvi sayda nəşrlərə səbəb olmuşdur. Katalizdə CO-nun oksidləşməsində olduğu kimi reaksiyanın daxili (dərin) mexanizmi haqqında belə yüksək məlumat səviyyəsi əldə etmək nadir haldır. Buna görə də, metal katalizatorlar üzərində aparılmış bu tədqiqatların əsas nəticələri icmalın birinci hissəsində qısaca nəzərdən keçirilmişdir.

CO-nun oksidləşmə reaksiyasında oksid katalizatorlar metal katalizatorlardan daha yüksək dərəcədə çoxfunksionallı katalizator kimi özünü aparır. Co₃O₄, CuO_x, yaxud MnO_x kimi ən aktiv oksidlərin aktivliyi reaksiya şəraitindən (CO/O₂ nisbəti, qazda su buxarının və ya digər qarışıqların olması) xeyli dərəcədə

asıdır. İcmalın ikinci hissəsi isə sadə oksidlər üzərində CO-nun oksidləşməsinin kinetikasına və mexanizminə həsr edilmişdir.

Ən aktiv katalizatorların əldə edilməsinə zəmin yaradan oksid quruluşunun öyrənilməsinə xüsusi diqqət yetirilmişdir. Ədəbiyyatlarda təqdim olunmuş nəticələrin əksəriyyətini, eləcə də CO-nun və O₂-nin adsorbsiyası və reaksiyası üçün ən çox ehtimal olunan sahələri və katalizatorun deaktivləşməsinə gətirib

çıxaran hadisələri başa düşmək üçün bu quruluşlardakı kation vəziyyətinin çoxyönlülüyü (Co³⁺/Co²⁺; Cu²⁺/Cu⁺/Cu⁰; Mn⁴⁺/Mn³⁺/Mn²⁺) yoxlanılmışdır.

Maraqlar münaqişəsi

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

REFERENCES

1. **Melikova I.G., Efendi A.J., Faradzhev G.M. i dr.** Kataliticheskoe okislenie hloriglevodorodov na katalizatorah iz blagorodnyh metallov // Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of I International scientific and practical conference. 2020. Buenos Aires, pp. 87-92.
2. **Chen-Bin Wang, Chih-Wei Tanga, Hsin-Chi Tsaia, and Shu-Hua Chien.** Characterization and Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide Over Supported Cobalt Catalysts //Catalysis Letters. 2006, v. 107, pp.3-4.
3. **Zeynalov E.T., Hüseynova E.Ə., Bağirova N.N., Əcəmov K.Y.** Aktivləşmə üsulunun nikel katalizatorunun aktivliyinə təsiri// Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. 2016. Cild 8. №2. Səh 72-77.
4. **Chul Min Bae, Jung Bong Ko, Dong Hyun Kim.** Selective catalytic oxidation of carbon monoxide with carbon dioxide, water vapor and excess hydrogen on CuO–CeO₂ mixed oxide catalysts // Catalysis Communications. 2005, v.6, pp. 507–511.
5. **Engel T., Ertl G.** Elementary Steps in the Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide on Platinum Metals // Adv. Catal. 1979, v. 28, pp.1–78.
6. **Nieuwenhuys B. E.** Correlation between work function change and degree of electron back-donation in the adsorption of carbon monoxide and nitrogen on group VIII metals //Surf. Sci. 1981, v. 105, pp. 505–516.
7. **Nieuwenhuys B. E.** Adsorption and reactions of CO, NO, H₂ and O₂ on group VIII metal surfaces // Surf. Sci. 1983, v. 126, pp.307–336.
8. **Malikova I., Efendi A., Babayev E., İsmayilova B., Aykan N.** Gas phase heterogeneous catalytic oxidation of chlorohydrocarbons. //Azerbaijan Chemistry Journal, 2016, № 3, c. 193-205.
9. **Heck R. M., Farrauto R. J.** Catalytic air pollution control: Commercial technology, 2nd edition Wiley, 2002, chap. 6, pp. 69 – 129.
10. **Rəsulov S.R., Səlimova N.A., Mustafayeva Q.R., Hüseynova L.V.** C₃-C₄ karbohidrogen emalının yüksək effektivli katalizatorlarının tədqiqi və hazırlanması // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. 2015. Cild 7. №2. Səh. 71-82
11. **Melikova, I.H.** Oxidation of chlorotoluene, toluene and chlorobenzene in the presence of Ag/MnO₂ catalyst //Azerbaijan Oil Industry, 2022, v. 10, pp.47-52.
12. **Manafov M.R.** Software application for solving some typical problems of chemical technology //Azerbaijan Chemical Journal, 2016. №4. Pp. 89–94.

UDC 648(07)

DOI 10.52171/herald.300

Solving the Problem of Determining an Intelligent Decision-Making System in the Industrial Safety Management System

S.R. Rasulov¹, S.A. Solod², E.Z. Yagubov², N.A. Abdullayeva¹

¹ *Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)*

² *Maykop State Technological University (Maykop, Adygea, Russian)*

For correspondence:

Sakit Rasulov / e-mail: rasulovsakit@gmail.com

Abstract

The article considers the problem of determining an intelligent decision-making and management system in the occupational safety management system at industrial enterprises based on game theory. For clarity and simplicity of presentation, we will assume that each of the parties involved in the conflict has two management strategies and for this reason it is possible to limit the solution of the problem on the basis of matrix and bimatrix games. The problem of determining the type of antagonism between the players and determining the goals of the systems, clarifying their interests is considered. The basic control subsystem is described, which will be described by a weight function, its parameters depend on the solution of the game problem and the choice of the intelligent control subsystem for the purpose of the system and the corresponding indicators and optimization criteria.

Keywords: occupational safety management system, conflict, game theory, intelligent decision-making systems, intelligent management system, matrix game.

Submitted 5 December 2024

Published 24 September 2025

For citation:

S.R. Rasulov, S.A. Solod, E.Z. Yagubov, N.A. Abdullayeva

[Solving the Problem of Determining an Intelligent Decision-Making System in the Industrial Safety Management System]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 91-97

Sənaye təhlükəsizliyi idarəetmə sistemində intellektual qərar qəbuletmə sisteminin müəyyən edilməsi probleminin həlli

S.R. Rəsulov¹, S.A. Solod², E.Z. Yaqubov², N.A. Abdullayeva¹

¹*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)*

²*Maykop Dövlət Texniki Universiteti (Maykop, Adıgey, Rusiya)*

Xülasə

Məqalədə oyun nəzəriyyəsi əsasında sənaye müəssisələrində əməyin mühafizəsi idarəetmə sistemində intellektual qərarların qəbulu və idarəetmə sisteminin müəyyən edilməsi problemi nəzərdən keçirilir. Məlumatın aydınlığı və sadəliyi üçün münaqişə ilə bağlı iştirak edən tərəflərin hər birinin iki idarəetmə strategiyasına malik olduğunu qəbul edəcəyik və buna görə də problemin həllini matris və bimatris oyunları əsasında məhdudlaşdırmaq mümkündür. Oyunçular arasında antaqonizmin növünü müəyyənləşdirmək, sistemlərin məqsədlərini aydınlaşdırmaq və onların maraqlarını müəyyən etmək problemi müzakirə olunur. Əsas idarəetmə alt sistemi təsvir olunur, bu da ağırlıq funksiyası ilə təsvir ediləcək, onun parametrləri oyun probleminin həllindən və sistemin məqsədinə uyğun ağıllı idarəetmə alt sisteminin seçilməsindən, müvafiq göstəricilərdən və optimallaşdırma meyarlarından asılıdır.

Açar sözlər: əməyin mühafizəsi idarəetmə sistemi, münaqişə, oyun nəzəriyyəsi, ağıllı qərar vermə sistemləri, ağıllı idarəetmə sistemi, matris oyunu.

Решение задачи определения интеллектуальной системы принятия решения в системе управления безопасностью труда промышленных производств

С.Р. Расулов¹, С.А. Солод², Е.З. Ягубов², Н.А. Абдуллаева¹

¹*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)*

²*Майкопский государственный технологический университет (Майкоп, Адыгея, Россия)*

Аннотация

В статье рассмотрена задача определения интеллектуальной системы принятия решения и управления в системе управления безопасностью труда на промышленных предприятиях на основе теории игр. Для наглядности и простоты изложения будем полагать, что каждая из сторон, принимающих участие в конфликте, имеет две стратегии управления и по этой причине можно ограничить решение задачи на основе матричной и биматричной игр. Рассмотрена задача определения типа антагонизма между игроками и определения целей действия систем, выяснения их интересов. Описана базовая подсистема управления, которая будет описываться весовой функцией, ее параметры зависят от решения игровой задачи и выбора подсистемой интеллектуального управления цели системы и соответствующих показателей и критериев оптимизации.

Ключевые слова: система управления безопасностью труда, конфликт, теория игр, интеллектуальные системы принятия решения, интеллектуальная система управления, матричная игра.

Введение

Рассмотрим задачу определения интеллектуальной системы принятия решения и управления (в системе управления безопасностью труда промышленных предприятий, на примере теории игр), на вход которой поступает сигнал, представляющий сумму полезного сигнала $G(t)$ и помехи $Z(t)$. При этом будем предполагать, что слежение за полезным сигналом осуществляет интеллектуальная система управления (игрок А), а помеху формирует противоположная сторона (игрок В), которая выбирает характеристики такими, чтобы ошибки следящей системы были большими. В результате возникает конфликт, который часто рассматривается в теории игр [1-10].

Постановка задачи

Для простоты и наглядности изложения будем полагать, что каждая из сторон имеет две стратегии управления и по этой причине можно ограничить решение задачи на основе матричной и биматричной игр.

Решение задачи

Пусть помеха представляет собой нормально распределенный белый шум с интенсивностями α_1, α_2 , выбором величины которых управляет игрок А. Полезный сигнал $G = G_0$ – числовая случайная величина, принимающая значения β_0 и $-\beta_0$ с вероятностью 0,5, величина которых формируется игроком А и может принимать значения β_{01}, β_{02} .

Желаемая выходная величина формируемой системы слежения – полезный сигнал. Система выбирается на классе стационарных систем, время регулирования которых не превосходит время Т.

В качестве показателя качества системы принимается суммарная ошибка системы ошибка системы D_Σ , которая определяется биномиальным распределением полезного сигнала D_1 и случайным характером помехи D_2 .

Следуя описанию, изложенному выше, запишем ошибки системы в следующем виде, формула 1:

$$D_1 = \int_0^T \int_0^T \delta(\tau_1 - \tau_2) \omega(\tau_1) \omega(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (1)$$

где $\delta(\tau_1 - \tau_2)$ – дельта-функция, принимающая нулевое значение, если $(\tau_1 - \tau_2) \neq 0$, и равна ∞ , если $(\tau_1 - \tau_2) = 0$; $\omega(\tau_1)$ – весовая функция при переменной τ_1 ; $\omega(\tau_2)$ – весовая функция при переменной τ_2 ;

$$D_2 = (\beta_0)^2 \left\{ \int_0^T \omega(\tau) d\tau - 1 \right\}^2 D_\Sigma = D_1 + D_2. \quad (2)$$

Базовая подсистема управления будет описываться некоторой весовой функцией, параметры которой зависят не только от решения игровой задачи, выбора подсистемой интеллектуального управления цели системы, но и соответствующих показателей и критериев оптимизации [11, 12].

Тогда для иллюстрации примем $T = 1$, и выражение для весовой функции можно записать в виде:

$$\omega_{ij}(\tau) = \beta_{0j}^2 (\alpha_i + \beta_{0j}^2)^{-1}, \quad (3)$$

где управление реализуется в виде весовых функций в зависимости от стратегий игроков (β_{0j}^2 максимизирует дисперсию ошибки, а α_i минимизирует ошибку слежения).

В этом случае дисперсии для принятой весовой функции записываются в

следующем виде:

$$D_1^{II} = \alpha_i (\alpha_i \beta_{0j}^2 + 1)^{-2}, D_2^{II} = \alpha_i^2 \beta_{0j}^2 (\alpha_i + \beta_{0j}^2)^{-2}. \quad (4)$$

Интеллектуальная подсистема В, наблюдая с помощью своих информационных и физических датчиков за игроком А, определяет его действия и формирует свою стратегию движения в каждой конкретной ситуации. Возникает задача ситуационного управления движением, когда решения и управления должны осуществляться в соответствии с той ситуацией, которая складывается в текущий момент конфликта.

Одной из наиболее сложных задач в данном случае является задача определения типа антагонизма между игроками и определения целей действия систем, выяснения их интересов. В практике конфликтных ситуаций о действиях другой стороны или игрока, как правило, используется информация, получаемая через информационные сообщения, телекоммуникационные сети и путем сбора различными способами конфиденциальной информации.

При реализации интеллектуальной экспертной системы используются эксперты и их оценки, возможен и аналитический подход к решению идентификации намерений и цели противоположной стороны на основе анализа конфликта. Если реализуется интеллектуальная подсистема на основе ситуационного управления, то возможна декомпозиция общей задачи на две части, когда интеллектуальная подсистема идентифицирует конкретную ситуацию, а управление в конкретной ситуации формируется на основе решения игровых задач для определения неопределенных стратегий или неопределенных параметров противодействующей стороны.

Вместе с тем интеллектуальная подсистема должна определять тип модели игры в конфликте. Возникает вопрос, как это может реализовать интеллектуальная подсистема и существует ли такая возможность?

Покажем возможность оценки действий соперника на основе обработки информации по решению задачи с помощью теории игр [13]. Для этого проанализируем результаты принятия решения при реализации матричной антагонистической игры. Вначале рассмотрим влияние конфликта на управление на примере единичной ситуации, когда время управления T фиксировано и единственное, а затем рассмотрим условную модель ситуационного управления на основе сценария, в котором достижение цели обеспечивается несколькими ситуациями управления в разные моменты времени T_v .

Примем, что игроки могут реализовать по две стратегии, т.е. конфликт описывается матрицей размерности 2×2 , где $(\beta_{01}^2 = 1, \beta_{02}^2 = 2)$ – значение стратегий игрока В и $(\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2)$ – значение стратегий игрока А. В этом случае, при принятых исходных данных матрицы выигрышей, можно записать в следующих видах (таблицы 1-3).

Таблица 1 – При анализе системы по дисперсии D_2

Table 1 – When analyzing the system by dispersion D_2

Стратегии В/А	$\beta_{01}^2 = 1$	$\beta_{02}^2 = 2$	Min по j	Max min
$\alpha_1 = 1$	0,5	0,667	0,5	0,5
$\alpha_2 = 2$	0,333	0,4	0,4	
Max по i	0,5	0,667		
Min max =	0,5			

Таблица 2 - При анализе системы по дисперсии D_1

Table 2 - When analyzing the system by dispersion D_1

Стратегии B \ A	$\beta^2_{01} = 1$	$\beta^2_{02} = 2$	Min по j	Max min
$\alpha_1 = 1$	0,25	0,011	0,011	
$\alpha_2 = 2$	0,011	0,08	0,08	0,08
Max по i	0,011	0,08		
Min max=	0,08			

Таблица 3 - При анализе системы по дисперсии D_Σ

Table 3 - When analyzing the system by dispersion D_Σ

Стратегии B \ A	$\beta^2_{01} = 1$	$\beta^2_{02} = 2$	Min по j	Max min
$\alpha_1 = 1$	0,75	0,678	0,678	
$\alpha_2 = 2$	0,344	0,48	0,48	0,48
Max по i	0,75	0,48		
Min max	0,48			

Все три антагонистические игры имеют седловые точки в чистых стратегиях, но цены игр у них разные:

$$\max_i \min_j D_{\mu}^{ij} = \min_j \max_i D_{\mu}^{ij}, \mu = (1, 2, 3), I = J = (1, 2) \quad (5)$$

Интересным результатом анализа дисперсий ошибок анализируемой системы является то, что гарантированная суммарная ошибка системы (равна 0,48) меньше гарантированной ошибки, получаемой только при учете нормальной составляющей ошибки (равной 0,5). Это также связано с тем, что дисперсии ошибок от

изменения сигнала помехи существенно меньше при α_2 влияют на дисперсию D_1 . По этой причине, если игрок А будет выбирать свою стратегию из условия увеличения дисперсии помехи, то он может быть наказан игроком В, который в этом случае может реализовать свою стратегию $\beta^2_{01} = 1$ (провести адаптивное управление) и благодаря этому получить дополнительный выигрыш, который будет равен 0,344, т.е. меньше гарантированного выигрыша на 0,135 (уменьшает дисперсию на 28.5%). Таким образом интеллектуальная подсистема на основе получения оценок интенсивности шума сможет определить, какой стратегии придерживается игрок А при противодействии игроку В.

Логика рассуждений интеллектуальной подсистемы может быть продолжена в том направлении, если игрок В откажется от использования гарантированных оценок, а будет применять критерии: минимаксного сожаления Сэвиджа, пессимизма-оптимизма Гурвица, «недостаточного основания» Бернулли.

Рассмотрим теперь случай, когда для достижения поставленной цели управления необходимо выполнения нескольких операций по слежению, согласно определенному сценарию (рис.), в котором последовательно реализуются три ситуации со временем управления $T_1=1$, $T_2=2$, $T_3=3$, а также показано начало работы системы и достижение цели в случае успешного выполнения всех планируемых операций.

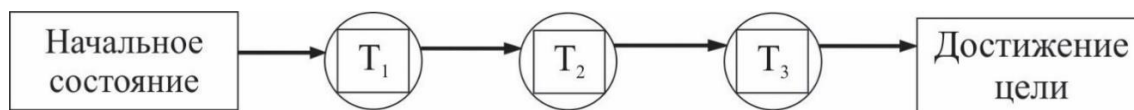


Рисунок – Сценарий сетевой модели, вершины которой соответствуют фактам, а дуги связям

Figure – Scenario of a network model, the vertices of which correspond to facts, and the arcs to connections

Таблица 4 – Виды управления, применяемые при конкретном уровне нестабильности

Table 4 – Types of control applied at a specific level of instability

Уровень нестабильности	Вид управления
1. Стабильность	Управление на основе инструкций (в том числе и по БТ)
2. Реактивность	Реактивное управление
3. Предвидение	Долгосрочное планирование
4. Исследование	Управление на основе предвидения изменений
5. Творчество	Стратегическое управление на основе гибких экстренных решений

В качестве критерия эффективности достижения цели примем условие получения оптимальных оценок в каждой ситуации, как это было сделано в первой ситуации при T_1 .

Для произвольного T_v дисперсии и определяемые весовые функции будут равны

$$\begin{aligned} D_1^{IJ} &= T_v \alpha_i (\alpha_i \beta_{0J}^2 + T_v)^{-2}, \\ D_2^{IJ} &= \alpha_i^2 \beta_{0J}^2 (\alpha_i + T_v \beta_{0J}^2)^{-2}, \\ \omega_{IJ}(\tau) &= \beta_{0J}^2 (\alpha_i + T_v \beta_{0J}^2)^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $v = (1, 2, 3)$, $i = (1, 2)$, $J = (1, 2)$, если использовать данные, принятые в начальных расчетах дисперсий и весовой функции при T_1 .

Одним из интересных предложений по развитию интеллектуальной подсистемы для оценки степени антагонизма между игроками и соответственно между интеллектуальными системами в условиях конфликта стало использование теории биматричных игр (таблицы 4 и 5).

Таблица 5 – Уровни нестабильности, который существует вокруг организации (компании в целом)

Table 5 – Levels of instability that exist around the organization (the company as a whole)

Уровень нестабильности	Вид стратегического управления
3,0-3,5	стратегическое планирование
3,5-4,0	управление посредством выбора стратегических позиций
4,0-4,25	управление путем ранжирования стратегических задач
4,25-4,75	управление в условиях слабых сигналов
4,75-5,0	управление в условиях стратегических неожиданностей

Заключение

В современных условиях уровень нестабильности очень высок, поэтому все чаще на предприятиях применяется управление 4 и 5.

Уровень нестабильности зависит и от отрасли, в которой хозяйствует компания.

По сути, выбор метода стратегического управления осуществляется в зависимости от уровня нестабильности в рассматриваемой отрасли. Все развитие стратегического управления идет по пути усложнения методов управления, которые должны были учитывать происходящие изменения и все более высокий уровень нестабильности, который требовал более эффективного управления.

Таким образом, каждый вид стратегического управления целесообразно применять при определенном значении уровня

нестабильности, который существует вокруг промышленного предприятия и отрасли в целом.

Чем выше уровень нестабильности, тем сложнее управление и больше усилий необходимо затрачивать для перехода на такой вид управления.

Конфликт интересов

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

REFERENCES

1. **Maxmutov N.A.** (2017). Bezopasnosti i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki. novosibirsk nauka, s. 724.
2. **Jirkov P.A., İvanov A.V, Raevskaya M.G.** (2017). O pravovom regulirovanii funktsionirovaniya i razvitiya informatsionno-texnologicheskoi osnovy mezhvedomstvennogo informatsionnogo vzaimodeistviya. Problemi bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii. № 6 . s.14-25.
3. **Fribman A.Ya., Kulik B.A.** (2022). Situatsionnaya kontseptualnaya model dlya sistemy situatsionnykh tsentrov. Gibrinnye i sinergeticheskiye intellektualnyye sistemy. Materialy VI Vserossiyskoy Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Kaliningrad. s. 213-220.
4. **Antonelli A., Smith R. J., Simmonds M.S.J.** (2019). Unlocking the properties of plants and fungi for sustainable development. Nature Plants 5:1100-1102. DOI: 10.1038/s41477-019-0554-1.
5. **Borgest N.M., Simonova E.V.** (2009). Osnovy postroyeniya multiagentnykh sistem, ispolzuyushchikh ontologii. Samara İzd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, s 80.
6. **Massel L.V., Massel A.G.** (2013). Semanticheskie texnologii na osnove integratsiyai ontologicheskogo, kognitivnogo və sobytiinogo modelrovaniya. III mezhdunar. nauchno-texnich. Konf. otkritie semanticheskie texnologii proektirovaniya intellektualnykh sistemi. Minsk Belarusiya. 21-23 fevralya. s. 247-250.
7. **İzmalkov V.A.** (2018). Sovremennyye tendensii razvitiya programmnogo i drugikh vidov obespecheniya AIUS RSCS. Texnologii grazhdanskoi bezopasnosti. T.15. №4 (58). s. 48-51.
8. **Trofimova N.V., Antamoshkin O.A., Antomoshkina O.A., Nichenorchuk V.V.** (2011). Sistema podderzhki prinyatiya reshenii po reagirovaniyu na ChS i proisshestviya na opasnykh proizvodstvennykh obektax. Texnologii grazhdanskoi bezopasnosti. T.8. №4(30). s. 64-70.
9. **Gorban A.N., Pitenko A.A., Zinovyev A.Y., Wunsch D.C.** (2011) Vizualization of any data using elastic map method. International Journal of Smart Engineering System Design. V.11, p. 363.
10. **Mammadova K.A.** (2023), TOPSİS Method and Fuzzy Rules on the Decision Making Based. Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, vol. 15, №3, pp. 104-110 .
11. **Solod S.A., Gega E.A., Novikov V.V.** (2008). Situatsionnye zadachi upravleniya pri prinyatii reshenii rukovoditelem v usloviyax informatsionnoi neopredelennosti. Maşinostroenie: Mezhevuzovskii sbornik nauchnykh statei (vtoroi vypusk). Pod obsh. Red. Prof. V.Q. Solonenko. KubQTU. Krasnodar. Izd-vo KubQTU, 159 s., s. 69-73.
12. **Qumbatov R.T., İbrahimov B.Q., İbrahimov R.F.** (2018). Ob odnom metode zashchity pereda-vaemoi informatsii v telekommunikatsionnykh sistemax. Vestnik Azerbaidjanskoi İnzhenernoi Akademii, tom 10, №2. s. 72-77.
13. **Solod S.A., Novikov V.V. i dr.** (2009). Situatsionnyi podkhod pri proektirovanii sistem upravleniya bezopasnostyu truda na promıshlennykh predpriyatiyax. Krasnodar: Izdatelskii Dom Yug.

UDC 004.056

DOI 10.52171/herald.301

Analysis of Robocall Attacks: Methods of Protection Against This Threat

T.Sh. Alakbarova, R.M. Hacıyev

Azerbaijan Technological University (Ganja, Azerbaijan)

For correspondence:

Tamara Alakbarova / e-mail: tamara.alekberova@gmail.com

Abstract

Cybercrime is recognized as any crime related to computers and the internet. It involves attacks on information about individuals, companies, or governments. When individuals are the primary target, their computers are used as tools in cybercrime. Cybercrimes also include traditional crimes committed with internet access. For example, telemarketing, internet fraud, identity theft, and credit card fraud are current examples of cybercrimes. In other words, cybercrime can be classified as an act of violence carried out using any device with internet access. Billions of robocalls are made around the world every month. Thanks to technology, telemarketers and scammers can make robocalls over the internet. Some robocalls may offer useful information, such as appointment reminders or canceled flights. However, they primarily aim to sell you something, and many of them are scams. When these calls are made, the caller often hides behind various excuses.

Keywords: internet, virtual networks, cyberattack, cybercrime, robocall.

Submitted 14 January 2025

Published 24 September 2025

For citation:

T.Sh. Alakbarova, R.M. Hacıyev

[Analysis of Robocall Attacks: Methods of Protection Against This Threat]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 98-103

Robocall hücumlarının təhlili: bu təhlükədən qorunma metodları

T.Ş. Ələkbərova, R.M. Hacıyev

Azərbaycan Texnologiya Universiteti (Gəncə, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə kibercinayətkarlıq məsələləri, kompüter və internetlə bağlı cinayətlər araşdırılıb. Bu fərdlər, şirkətlər və ya hökumətlər haqqında məlumatlara hücumları əhatə edir. Fərdlər əsas hədəf olduqda, onların kompüterləri kibercinayətkarlıqda alət kimi istifadə olunur. Kibercinayətlərə internetə çıxışla törədilən ənənəvi cinayətlər də daxildir. Məsələn, telemarketing, internet fırıldaqçılığı, şəxsiyyət oğurluğu və kredit kartı fırıldaqları kibercinayətlərin cari nümunələridir. Başqa sözlə, kibercinayət internetə çıxışı olan istənilən cihazdan istifadə etməklə həyata keçirilən zorakılıq aktı kimi təsnif edilə bilər. Dünyada hər ay milyardlarla robot zəng edilir. Texnologiya sayəsində telemarketlər və fırıldaqçılar internet üzərindən robot zənglər edə bilirlər. Bəzi robot zənglər görüş xatırlatmaları və ya ləğv edilmiş uçuşlar kimi faydalı məlumatlar təklif edə bilər. Məqalədə robot zəng hücumlarının müxtəlif növləri sadalanıb, onlardan qorunma üsulları təsvir edilib.

Açar sözlər: internet, virtual şəbəkələr, kiberhücum, kibercinayət, robot zəng.

Анализ атак роботов-вызовов: методы защиты от угрозы

Т.Ш. Алекперова, Р.М. Гаджиев

Азербайджанский технологический университет (Гянджа, Азербайджан)

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы киберпреступности – преступлений, связанных с компьютерами и Интернетом. Это включает в себя атаки на информацию об отдельных лицах, компаниях или правительствах. Киберпреступления также включают традиционные преступления, совершаемые с доступом в Интернет. Современными примерами киберпреступлений являются telemarketing, интернет-мошенничество, кража личных данных и мошенничество с кредитными картами. Киберпреступность можно классифицировать как акт насилия, совершаемый с использованием любого устройства с доступом в Интернет. По всему миру совершаются миллиарды звонков от роботов. Благодаря технологиям telemarketers и мошенники могут совершать звонки через Интернет. В статье приводятся различные типы атак роботов-вызовов и описываются методы защиты.

Ключевые слова: Интернет, виртуальные сети, кибератака, киберпреступность, робот-вызов.

Introduction

Developments in information and communication technology have provided advantages such as communication, quick access to information, and global trade. Additionally, both individuals and institutions face new economic lifestyles and opportunities, which come with certain challenges. Information, particularly internet technologies, has become essential in every field, especially in business, where they are increasingly used to remain competitive, ensure sustainability, and facilitate easy access to new economic advantages [1]. Instant access to products and services over the internet has enhanced the functionality and efficiency of organizations across all sectors, including production and inventory control, as well as supply chain management, especially in trade.

However, alongside these positive impacts, the use of the internet and information technologies also brings cyber threats and attacks aimed at accessing databases where production and stored data reside. The types and applications of these attacks are constantly evolving, and they are expected to manifest more destructively in the near future.

Nevertheless, businesses have limited information about the potential damage they may face and often lack adequate protection against cyber threats and attacks. Information systems have created significant environments and opportunities for terrorist organizations and cybercriminals to engage in illegal activities, leading to new avenues for illicit revenue [2].

Attacks on government agencies, private organizations, and individual information systems pose a threat to our country, as they

do worldwide. Attacks from hackers and cyberterrorist organizations can harm many sectors and significantly damage the national economy. Despite the fact that cyberattacks and threats are dangers for all sectors, a lack of awareness about cyberattacks and the failure to implement necessary precautionary measures highlight the seriousness of this threat. [3]

Robocall Attack. A robocall refers to calls made automatically by a computer system that share pre-recorded messages. In the past, robocalls were primarily associated with telemarketing, political messages, and surveys conducted by election candidates. However, they have become particularly notorious in the U.S. for capturing individuals' personal information through phone conversations and using it for malicious purposes [4]. Automatic bot calls are also referred to as spam calls or fake calls.

While there may be beneficial uses for automatic calls, such as informing a company's users or school parents, or notifying the public in emergencies, fake spam calls receive backlash in many different parts of the world due to their fraudulent nature.

This system is becoming increasingly prevalent because searches can be easily conducted using software that even someone with limited technical knowledge can operate, thanks to low costs associated with searching. The virtually zero barriers to entry mean that anyone with malicious intent can easily utilize this system.

What makes fake calls particularly dangerous is the ability of relevant software to display the calls as coming from completely different numbers. VoIP (Voice over IP) technology allows users to change their number from anywhere in the world, making it

seem as if they are calling from the desired country [5]. For example, a scammer on the other side of the world can manipulate the system to make it appear as though they are calling from your bank in your country. This can lead to people answering calls they would typically ignore, putting them at greater risk of falling victim to scams.

Key Features of Robocall Attacks:

Robocall attacks involve mass calling campaigns conducted through automated phone calls. These calls are typically used for various purposes, such as advertising, fraud, political campaigns, and more. Many robocall attacks are illegal or unwanted, causing significant distress for users.

We can divide the key features of robocall attacks into 8 parts.

1. **Automated Calls.** Robocalls are executed with the help of automated systems. These systems can make thousands of calls quickly through computers programmed with specific algorithms or automatic calling applications installed on phones. These calls are carried out using pre-recorded messages, which typically include sales offers, surveys, advertisements, political messages, and more.

2. **Fake Numbers.** Robocalls often use "caller ID spoofing" technology to execute attacks. This technology displays a fake number as the one receiving the call. By doing this, the caller hides their real number and shows familiar or local numbers to convince users to answer the call. This increases the likelihood that users will pick up the call and trust the incoming number.

3. **Fraud.** Statistics indicate that the majority of robocalls are intended for fraudulent purposes. These calls often present users with various scam schemes, the most common of which include:

- Notifications about fake lotteries or prizes.

- Phishing attack calls aimed at stealing bank or financial information.

- Fake notices related to tax debts or legal issues.

- Offers of counterfeit products or services.

- Scammers pressure users to take immediate action, such as demanding payment quickly because an offer is about to expire or requesting credit card information under the pretext of protecting personal data.

4. **Advertising.** While some robocalls may be legal, advertising calls made without users' consent are considered illegal. These calls promote products or services. When users opt out of such calls, the calling company is required to honor that request, but this rule is not always followed. Despite numerous complaints, these calls may continue. Sometimes, incoming calls appear to come from a legitimate company number but are actually made by a scammer.

5. **Political Campaigns.** During election periods, political parties or candidates use robocalls to disseminate their messages and engage with voters. These calls provide detailed information about the candidates, solicit support for campaigns, and share information about election dates and polling locations. While these calls may be legal in some instances, they are often unwanted and can cause annoyance.

6. **Surveys and Polls.** Some robocalls ask users to participate in surveys and polls. During these calls, users are asked questions on various topics and their opinions on those questions are solicited. These calls are often used to gather information for commercial purposes.

7. Security and Privacy Risks.

Phishing: Robocall attacks often present users with various fraudulent scenarios to steal their personal information (e.g., social media accounts, bank details, credit card numbers, etc.). Scammers frequently impersonate representatives of banks, government organizations, or well-known companies.

Vishing (Voice Phishing): This type of attack is a form of phishing conducted through voice calls. Users are asked to provide confidential information (e.g., the CVV number of a bank card), which is then used for fraudulent purposes.

8. Legal and Regulatory Measures.

Various countries have laws and regulatory measures in place to combat robocall attacks, and these are continually developed to meet demand. For example, in the United States, the Federal Trade Commission (FTC) and the Federal Communications Commission (FCC) implement various rules and penalties to address robocalls. Other countries have enacted similar laws. In Azerbaijan, the existing laws include the following.

Robocall attacks remain a significant issue in today's world, and addressing this problem requires collaborative efforts from both users and legislative bodies. Strengthening this fight is possible through technological solutions, legal measures, and public awareness campaigns.

Methods for Protecting Against Robocall Attacks. As the name suggests, a robocall comes from a computerized automated caller, functioning like a robot. These calls often offer pre-recorded messages to promote political campaigns, telemarketing, or public service announcements.

Telemarketing calls, also known as internal sales, come from vendors or services encouraging consumers to purchase their products, while spam calls are a general term for unwanted calls that originate from suspicious numbers [6].

Robocalls designed to deceive people are illegal worldwide. In January 2020, the U.S. Congress passed the TRACED Act, which expands the Federal Trade Commission's mandate to combat spam calls with bipartisan support. This law increases penalties for robocalls from \$1,500 to up to \$10,000 per spam call.

According to an industry report by Truecaller, fraud attempts and financial scams are the most common reasons behind the majority of these calls. Spam calls lead to one in ten Americans losing money to phone scams.

According to data from the call protection company "First Orion," half of the calls received in 2019 were spam or automated calls. This highlights the need for more effective methods to block automated calls.

The identification and classification of various types of cybercrimes is an interesting topic for researchers for several reasons. One of the primary reasons is to provide a general definition of the concept of cybercrime [7].

Secondly, having a precise definition of what cybercrime results in helps researchers and practitioners determine the scope of the problem to be addressed. Thirdly, understanding the various aspects of cybercrime (such as distinguishing between the "technical" and "human" dimensions of cybercrime) can assist law enforcement and criminal justice agencies in investigating, combating, and preventing such crimes.

Finally, identifying and differentiating various types of cybercrime allows researchers and practitioners to anticipate future trends in cybercriminality and develop timely solutions.

Conflict of Interests

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

REFERENCES

1. **Tu H., Doupé A., Zhao Z., Ahn G.-J.** Systems and methods for authenticating caller identity and call request header information for outbound telephony communications, 03 2016.
2. **Guiora A.N.** What is Cybersecurity. Cybersecurity Geopolitics, law, and policy. Routledge, Newyork, 16-20.<https://books.google.com.tr/>. (27.01.2021).
3. **Ələkbərova T.Ş.** Blokçeyn texnologiyasında mövcud olan kiber hücumlar və Blokçeyn texnologiyasının təhlükəsizliyi // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2024, cild.16 (3), s. 87-93.
4. CBS Netherlands. Less traditional crime, more cybercrime. (2020)
5. **Standler B. R.** Computer crime.<http://www.rbs2.com/ccrime.htm> (01.11.2020).
6. **Grabosky P., Smith R.** Telecommunication fraud in the digital age: The convergence of technologies. In Crime and the Internet, edited by David S. Wall, London: Routledge. (2001). 29-43.
7. **Khan S.F., Portmann M., Bergmann N.W.** A Review of Methods for Preventing Spam in IP Telephony, Modern Applied Science, vol. 7, no. 7, p. p48, 2013.

UDC 681.372.54

DOI 10.52171/herald.302

Solving the Problem of Synthesis of an Automatic Control System for a Distillation Column

A.A. Safarova

Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Aygun Safarova / e-mail: aygsafa@rambler.ru

Abstract

The oil refining and petrochemical industries are considered to be the leading sectors of the national economy. The purpose of these facilities is to ensure the production of a wide range of high-quality petroleum products from crude oil. The requirements for quality indicators of various petroleum products produced at these technological facilities require the creation of more modern and advanced control systems. It should be noted that one of the main problems of control theory is the creation and development of new control systems capable of adequately responding to more dynamically changing external and internal stimuli for complex oil refining technological complexes in accordance with the requirements of the time. Therefore, it is relevant to create new automated control systems capable of providing the required accuracy of quality control.

Keywords: distillation column, transfer function, controller, control system, dynamic characteristics.

Submitted 9 February 2025

Published 24 September 2025

For citation:

A.A. Safarova

[Solving the Problem of Synthesis of an Automatic Control System for a Distillation Column]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 104-110

Distillə kalonunun avtomatik idarəetmə sisteminin sintezi məsələsinin həlli

A.A. Səfərova

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Neft emalı və neft-kimya sənayesi xalq təsərrüfatının aparıcı sahələri hesab olunur. Bu qurğuların məqsədi xam neftdən yüksək keyfiyyət göstəricilərinə malik geniş çeşiddə neft məhsullarının istehsalını təmin etməkdən ibarətdir. Bu texnoloji qurğularda istehsal olunan müxtəlif neft məhsullarının keyfiyyət göstəricilərinə qoyulan tələblər daha müasir və mükəmməl idarəetmə sistemlərinin yaradılmasını tələb edir. Qeyd etmək lazımdır ki, hal-hazırda dövrün tələblərinə uyğun olaraq mürəkkəb neft emalı texnoloji kompleksləri üçün daha dinamik dəyişən xarici və daxili həyəcanlandırıcı təsirlərə adekvat reaksiya göstərə bilən yeni idarəetmə sistemlərinin yaradılması və inkişaf etdirilməsi idarəetmə nəzəriyyəsinin qarşısında duran əsas problemlərdən biridir. Buna görə də keyfiyyət baxımından idarəetmədə tələb olunan dəqiqliyi təmin edə bilən yeni avtomatlaşdırılmış idarəetmə sistemlərinin yaradılması aktualdır.

Açar sözlər: distillə kalonu, ötürmə funksiyası, kontroller, idarəetmə sistemi, dinamik xarakteristikalar.

Решение проблемы синтеза системы автоматического управления ректификационной колонной

А.А. Сафарова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)

Аннотация

Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность считаются ведущими отраслями народного хозяйства. Цель этих предприятий - обеспечить производство широкого спектра высококачественных нефтепродуктов из сырой нефти. Требования к показателям качества различных нефтепродуктов, производимых на этих технологических объектах, требуют создания более современных и совершенных систем управления. Следует отметить, что одной из основных проблем теории управления является создание и развитие новых систем управления, способных адекватно реагировать на более динамично изменяющиеся внешние и внутренние факторы для сложных нефтеперерабатывающих технологических комплексов в соответствии с требованиями времени. Поэтому актуальным является создание новых автоматизированных систем управления, способных обеспечить требуемую точность контроля качества.

Ключевые слова: дистиляционная колонна, передаточная функция, контроллер, система управления, динамические характеристики.

Introduction

The experience of operation of numerous complex technological objects in various branches of oil refining industries has shown that the characteristic features of these complex technological processes are mainly the following [1]: complexity of devices as control objects; the feedstock arriving at the refining enterprise varies within rather wide limits both in terms of consumption and composition (quality indicators); the presence of a large number of controlled and uncontrolled excitatory influences, to a greater or lesser extent affecting the course of the technological process; non-stationarity of static and dynamic characteristics of processes; the complexity of building mathematical models that can adequately reflect the course of processes, due to the complex nature of dependencies between input and output parameters, as well as the lack of a complete mathematical description for many complex technological processes; high error of measurements of some technological parameters, and sometimes the lack of operational methods of measurements and control and measuring instruments, etc.

Under these conditions, it is impossible to achieve the criteria established in quality management by optimizing static modes of technological processes only at the traditional upper level. Therefore, solving the problems of synthesizing a control system capable of ensuring compliance of quality indicators of various fuel fractions obtained in the process of oil refining with the requirements of the standard at any values of flow rate and quality indicators of crude oil fed to the atmospheric unit in the technological complex of primary oil refining is relevant both from the scientific and practical points of view.

Taking all this into account, the paper proposes as a research problem to develop a control system for the atmospheric block of the technological complex of primary oil refining in such a way that this system provides an optimal mode of operation of the system as a whole, regardless of the various influences occurring in the technological complex.

Purpose of the work

The issue of optimal adjustment of controller is included in automatic control system is considered, the transfer function of control systems is determined, on the basis of which the curve of the transient process of the automatic control system is constructed and the quality indicators of transient response are determined.

Problem statement

The quality indicators of the automatic control system in dynamic modes depend on the characteristics of the control object. For this reason, in order to develop control systems with sufficient stability, reliability and high quality indicators, it is necessary first of all to study the dynamic characteristics of the automatic control object. Static and dynamic characteristics are studied both experimentally and analytically, depending on the characteristics of the object under study. However, to assess the dynamic characteristics of control objects, active experiments are carried out with open states of control circuits. Otherwise, it is necessary to use experimental methods for studying the characteristics of regulated objects. Taking into account all this, in the paper a methodology is given for solving the above issues without interfering the normal operating modes of control systems.

To solve the synthesis problem, first of all, the transfer function is determined based on the step response. The transfer function defines the relation between the output and the input of a dynamic system [2]. The step response is shown in (Fig. 1).

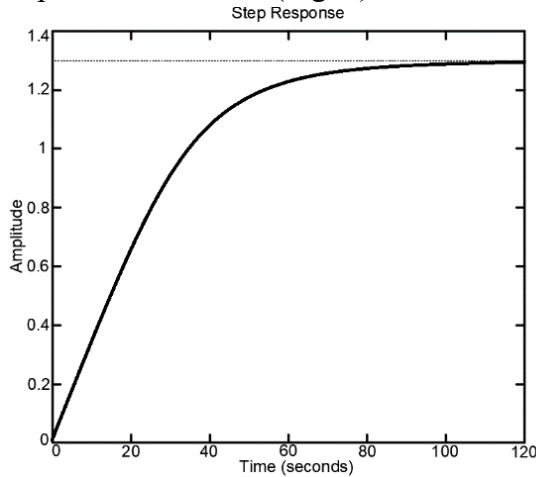


Figure 1 – Step response

Here, in order to adjust the temperature, it is necessary to change the fuel consumption, that is, to change the movement of the actuator. On the commissioning curve, the distance of the actuator is $\Delta x=5\%$, and the temperature change corresponding to this distance is 110-120 °C (7.5%). There are various methods for calculating the transfer function. To calculate the transfer function in this paper the Simoyu Method was used. The input and output variables of the object were observed by performing an active experiment. A stepped control action was applied and a recording was made of the resulting output data, which was in the form of a transient response. In this method, the calculation is performed in the following sequence [3-5].

1. The time characteristic is divided into intervals with $\Delta t=1\text{min}$;

2. Let us write down the ratio of the values $\Delta y(t)$ and $\Delta y_{\max}$ corresponding to the intervals Δt ;

3. The fields are determined by performing appropriate calculations.

Field F1 is defined as follows:

$$F_1 \cong \Delta t \{ \sum_{i=1}^n (1-y)_i - 0,5[1-y(0)] \} \quad (1)$$

Then $[1-y(t)]$ is established in a different timeline. Therefore, the variable θ implies.

$$\sum_{i=1}^n [1-y(i\Delta\theta)][1-i\Delta\theta] \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n [1-y(i\Delta\theta)] \left[1 - 2 \cdot i\Delta\theta + \frac{(i\Delta\theta)^2}{2} \right] \quad (3)$$

Then the F2 and F3 fields are calculated:

$$F_2 \cong F_1^2 \Delta\theta \{ \sum_{i=1}^n (1-y)(1-\theta)_i - 0,5[1-y(0)] \} \quad (4)$$

$$F_3 \cong F_1^3 \Delta\theta \left\{ \sum_{i=1}^n (1-y) \left(1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2} \right)_i - 0,5[1-y(0)] \right\}$$

The results are shown in Table 1.

If any of the fields is negative then the transfer function will be in the form:

$$W(p) = \frac{b_1 p + 1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (5)$$

If all fields are positive, then the transfer function will be as follows:

$$W(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (6)$$

After applying input to the control system, output takes certain time to reach steady state. So, the output will be in transient state till it goes to a steady state. Therefore, the response of the control system during the transient state is known as transient respons. The transient state response of control system gives a clear description of how the system functions during transient state [6, 7].

Solving of the problem

Based on the method of “field” we can write a transfer function, given the calculated values $a_1=F_1$, $a_2=F_2$, $a_3=F_3$:

$$F_1 = 2,4242, F_2 = 1,70098, F_3 = 18,866$$

$$W(p) = k / (2.42p^3 + 1.701p^2 + 18.87p + 1) \quad (7)$$

The next step is to convert the transfer function from a dimensionless form to a dimension form;

$$W_o(P) = K_{ob} W(P) \quad (8)$$

In this formula

$$K_{ob} = \frac{\Delta y_{max}}{\Delta x} = \frac{7.5}{5} = 1.5$$

then $W_o(P)$ takes the following form:

$$W(p) = 1.3 / (2.42p^3 + 1.701p^2 + 18.87p + 1) \quad (9)$$

The results are shown in Table.

Algorithm of obtaining a transition response is as follows:

```
>> Wt=tf([1.3],[2.42 1.701 18.87 1]);
>> Wt=tf([0.54 0.23],[1 0]);
>> Wo= tf([1.3],[2.42 1.701 18.87 1]);
>> W1=series(Wt,Wo);
>> Fi=feedback(W1,1);
>> step(Fi);grid
```

The transition response is shown in (Fig.2).

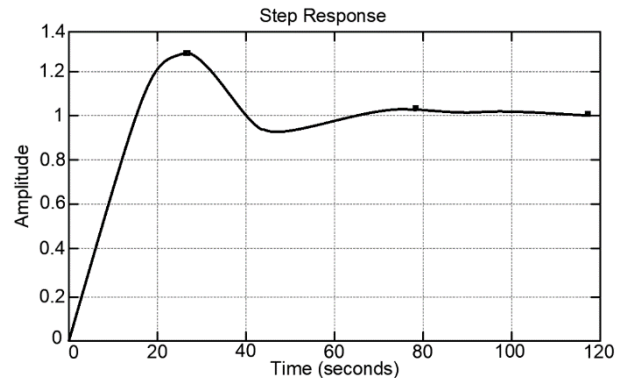


Figure 2 – The transient response

The transient state response of control system gives a clear description of how the system functions during transient state. Based on the transition response, we determine the following quality indicators:

Overshoot - 37%

Control time – 24.4

The first maximum – 1.32

The second maximum - 1.03

Static error – 0

The quality indicators obtained based on transient response meet the requirements for a sustainable control system.

Conclusion

In the presented paper, the distillation column which is the main technological device of the primary oil refining unit, has been studied as a control object. Due to the non-stationarity of the dynamic characteristics of this control object, the necessity of periodic and operational assessment and adjustment of control systems is substantiated. The evaluation of dynamic model of automatic control system of the distillation column of a technological facility is solved. It involves calculation of transfer function of the controller, building of transient response and determination quality indicators of the transient response.

Table – The calculation results of transfer function

t	y(t)	1-y(t)	θ	$1-\theta$	C*E	$1-2\theta + (\theta^2)/2$	G*H
A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	1	0	1	1	1	1
0,3	0,045	0,955	0,124	0,876248	0,8368167	0,7959717	0,760153
0,6	0,1	0,9	0,248	0,752496	0,6772461	0,5951339	0,495621
0,9	0,158333	0,841667	0,371	0,628744	0,5291924	0,387805	0,306403
1,2	0,225	0,775	0,495	0,504991	0,3913683	0,170967	0,132499
1,5	0,283333	0,716667	0,619	0,381239	0,2732214	-0,06431	-0,17609
1,8	0,4	0,6	0,743	0,257487	0,1544922	-0,348939	-0,20936
2,1	0,475	0,525	0,866	0,133735	0,0702108	-0,680615	-0,39732
2,4	0,566667	0,433333	0,99	0,009983	0,0043258	-1,130695	-0,48997
2,7	0,691667	0,308333	1,114	-0,11377	-0,035079	-1,969616	-0,6973
3	0,733333	0,266667	1,238	-0,23752	-0,063339	-2,659922	-0,75931
3,3	0,775	0,225	1,361	-0,36127	-0,081287	-3,537842	-0,79601
3,6	0,808333	0,191667	1,485	-0,48503	-0,092963	-4,525562	-0,8874
3,9	0,85	0,15	1,609	-0,60878	-0,091317	-6,156485	-0,97357
4,2	0,866667	0,133333	1,733	-0,73253	-0,097671	-7,231743	-0,96423
4,5	0,875	0,125	1,856	-0,85628	-0,107035	-7,917381	-0,98967
4,8	0,8875	0,1125	1,98	-0,98003	-0,110254	-8,887117	-0,9998
5,1	0,895	0,105	2,104	-1,10379	-0,115898	-9,472516	-0,99461
5,4	0,925	0,075	2,228	-1,22754	-0,092065	-12,98817	-0,97411
5,7	0,95	0,05	2,351	-1,35129	-0,067565	-18,76595	-0,9383
6	0,958333	0,041667	2,475	-1,47504	-0,06146	-21,29184	-0,90717
6,3	0,966667	0,033333	2,599	-1,5988	-0,053293	-24,62191	-0,88072
6,6	0,983333	0,016667	2,723	-1,72255	-0,028709	-44,33686	-0,85896
6,9	1	0	2,846	-1,8463	0	0	0
		8,580833			2,8389391		-11,201

Conflict of Interests

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

REFERENCE

1. **Agayev F.H., Safarova A.A.** Calculation of corrective signal for adaptive control systems of technological processes of oil refining. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 13(3): pp.94-99. January, 2021. DOI:10.52171/2076-0515202113039499
2. **Safarova A.A.** Determination of the Transmission Function of the Automatic Adjustment System of the Tubular Furnace // *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*, 2022, Vol. 14, № 1, pp. 101-105. DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_101_105
3. **Voronin A.V.** Synthesis of control system for an unstable object by real interpolation method [Electronic resource] / Voronin, A.V., Goncharov, V.I., Shchelkanova, T.A. // *Advanced Materials Research* [Electronic resource]: Scientific Journal. 2014. Vol. 905: Advances in Applied Materials and Electronics Engineering III. – Pp. 439-442. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.905.439>
4. **Voronin A.V.** Synthesis of multi-loop automatic control systems by the nonlinear programming method / A.V. Voronin, T.A. Emelyanova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016): International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation: [proceedings]. – 012179, 4 p.
5. **Emelyanova T.A.** Non-linear programming in the synthesis of regulators [Electronic resource] / Emelyanova T.A., Voronin A.V., Goncharov V.I. // I International Forum “Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2015: Paper book of the International Forum IEET-2015. Pp. 68-63. – Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU. – 2016. – 208 p. – URL: <http://pribor21.istu.ru/proceedings/IEET-2015.pdf>
6. **Mathukumalli Vidyasagar.** Control Systems Synthesis. A Factorization Approach, Part I. Synthesis Lectures on Control and Mechatronics. Springer Nature Switzerland AG 2011, XVII, 166 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-01828-2>. (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-01828-2>).
7. **Ustimenko V.V., Chubar A.V., Mikhaylenko L.A.** Automated setting of regulators for automated process control systems in the SimInTech visual modeling system. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 21, №. 3, pp. 337-346. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-337-346.

UDC 542.23

DOI 10.52171/herald.303

Analysis and Assessment of Security in Cyber-Physical Systems

P.A. Abbasova

Azerbaijan Technological University (Ganja, Azerbaijan)

For correspondence:

Parvin Abbasova / e-mail: p.abbasova@atu.edu.az

Abstract

With the digitalization of the world, cyber attacks have entered our lives, initially possessing a simple and easily understandable structure. However, today they have become increasingly complex and difficult to investigate. To address this problem, the collection of intelligence data related to attacks before they occur, and their detection after they happen, have become two essential components of modern cybersecurity. In particular, the successful integration of large-scale network infrastructures into the field of cybersecurity in recent times has made it necessary to utilize these technologies both in cyber threat intelligence and attack detection systems. This study explores cyber threat intelligence, attack detection systems, and large-scale network technologies, reviews the work focused on cyber threat intelligence and attack detection systems that utilize large network technologies, and provides various evaluations.

Keywords: cyber-physical system, IoT, information security, cybersecurity, cyber death, risk.

Submitted 14 April 2025

Published 24 September 2025

For citation:

P.A. Abbasova

[Analysis and Assessment of Security in Cyber-Physical Systems]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 111-118

Kiberfiziki sistemlərdə təhlükəsizliyin analizi və qiymətləndirilməsi

P.Ə. Abbasova

Azərbaycan Texnologiya Universiteti (Gəncə, Azərbaycan)

Xülasə

Rəqəmsallaşan dünya ilə bərabər həyatımıza daxil olan kiber hücumlar əvvəllər sadə və aydınlaşdırılması asan struktur idi. Lakin bugün artıq qarışıq bir struktura sahib və tədqiq edilməsi çətin hal almışdır. Bu problemi aradan qaldırmaq məqsədilə hücumların gerçəkləşmədən əvvəl onlara aid kəşfiyyat məlumatların toplanması, həyata keçdikdən sonra isə tapılması günümüzün ayrılmaz iki əsas üsürü olmuşdur. Xüsusilə son zamanlarda böyük şəbəkə avadanlıqlarında kiber təhlükəsizlik sahəsinə uğurla tətbiqi, istər kiber təhdid kəşfiyyatı istərsə də hücum təhlükəsi sistemlərində bu texnologiyalardan faydalanmağı məcbur etmişdir. Bu işdə kiber təhdid kəşfiyyatı, hücum təhlükəsi sistemləri və böyük şəbəkə texnologiyaları açıqlanmış, böyük şəbəkə texnologiyalarından faydalanan kiber təhdid kəşfiyyatı və hücum təhlükəsi sistemlərinə yönəlmiş işlər nəzərdən keçirilmiş və müxtəlif qiymətləndirilmələr edilmişdir.

Açar sözlər: kiberfiziki sistem, əşyaların interneti (IoT), informasiya təhlükəsizliyi, kibertəhlükəsizlik, kiber ölüm, risk

Анализ и оценка безопасности в киберфизических системах

П.А. Аббасова

Азербайджанский технологический университет (Гянджа, Азербайджан)

Аннотация

С развитием цифрового мира кибератаки вошли в нашу жизнь, изначально имея простую и легко объяснимую структуру. Однако сегодня они приобрели сложный характер, и их анализ стал затруднительным. С целью устранения данной проблемы сбор разведывательной информации о киберугрозах до их реализации, а также их обнаружение после атаки стали двумя неотъемлемыми элементами современной кибербезопасности. Успешное применение крупномасштабного сетевого оборудования в области кибербезопасности, особенно в последнее время, сделало использование этих технологий необходимым как в системах киберугрозной разведки, так и в системах обнаружения атак. В данной работе рассматриваются киберугрозная разведка, системы обнаружения атак и крупномасштабные сетевые технологии, а также анализируются исследования, направленные на применение таких технологий в системах кибербезопасности, и представлены различные оценки.

Ключевые слова: киберфизическая система, интернет вещей (IoT), информационная безопасность, кибербезопасность, киберсмерть, риск.

Giriş

İnformasiya və kommunikasiya texnologiyalarının sürətlə inkişaf etdiyi dövrdə sosial strukturların və aktorların hər bir səviyyəsi mürəkkəb və qeyri-müəyyənliklərlə dolu bir mühitdə yaşamaqlı olur. Yaşadığımız əsrin postmodern şəraitində çətinlik və qaranlıqla dolu dünyanın mərkəzində şübhəsiz ki, təhlükəsizlik anlayışı dayanır. Kiberməkan adlanan və informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının yaratdığı, kompüter sistemlərini, onlayn kommunikasiya şəbəkələrini və idarəetmə proseslərini özündə birləşdirən bu nəhəng dünya qlobal miqyasda sosial, iqtisadi, siyasi və mədəni integrasiyanın tərkib hissəsi kimi sürətlə inkişaf edir. Belə integrasiyanın əsasını bilik təşkil edir. İnformasiya cari əsrin ən mühüm istehsal və istehlak məhsuludur. Biliyə əsaslanmayan hər hansı məhsul və ya xidmət istənilən keyfiyyət və standart sayılmır [1].

Müasir kiber dünyasının ən əsas elementi internet bazasıdır. Hal-hazırda istifadə olunan bütün kompüterlər, elektrik xətləri, radio-lar, peyk sistemləri, hər cür elektrik və elektromaqnit cihazları, mobil telefonlar, peyklər, robot sistemlər, bütün insanlı və ya pilotsuz hava, quru və dəniz nəqliyyat vasitələri internet bazasında kodlanmış proqram sistemləri sayəsində işləyir. Bütün bu alətlər və avadanlıqlar həm də kiberməkan dünyasının mühüm elementləri hesab olunur. Bu vasitələrin və bütövlükdə internet bazasının təhlükəsizliyi çox vacibdir. Son illərdə mütəşəkkil cinayətkarlıq və terror təşkilatları öz fəaliyyətlərini planlaşdırmaq, təlimlər keçirmək, informasiya və təbliğat texnikalarını paylaşmaq kimi diqqətlərini kiberməkana yönəlmiş, məqsədlərinə çatmaq üçün informasiya-kommunikasiya texnologiyalarından istifadə etmişlər.

Kibertəhlükəsizlik və müdafiə fəaliyyətləri aktivləşdirdikləri hücum və təhdidlərə gö-

rə fərdlər, qurumlar, təşkilatlar və dövlətlər səviyyəsində əhəmiyyətini artırmışdır. Kiber dünyanın ən mühüm açarı olan təhlükəsizlik şəbəkəsi, müasir həyatın adı təhlükəsizlik anlayışları ilə integrasiya olunaraq kibertəhlükəsizlik anlayışı adlandırılmağa başlayıb. Ədəbiyyatda kibertəhlükəsizliklə bağlı bir çox təriflər verilməyə çalışılsa da, artıq bütün sətirləri ilə ortaya çıxan kibertəhlükəsizlik anlayışından danışmaq mümkün deyil [2]. Bu vəziyyətin əsas səbəbi kibertəhlükəsizlik anlayışının ölçü və sərhədlərinin çəkilə bilməməsidir. Əslində, informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının qlobal internet şəbəkəsi ilə integrasiyası və müasir həyatın sahələrinə daxil olması kibertəhlükəsizlik konsepsiyasının çərçivəsini əngəlləyir. Bununla belə kibertəhlükəsizlik anlayışı informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının çox sürətlə inkişaf etdiyi bu gün ayrı-ayrı şəxslərin, qurumların, beynəlxalq təşkilatların və dövlətlərin ən mühüm gündəm məsələlərindən birinə çevrilib. Bu gün əhəmiyyəti danılmaz hala gələn kibertəhlükəsizlik anlayışı qlobal postmodern sivilizasiya prosesinin daimi mövzusu olacaqdır. Kibertəhlükəsizlik sahəsində hər gün bir çox təhlükələr meydana çıxsada, bu təhlükələri kateqoriyalara bölmək mümkündür.

İşin məqsədi

Kiberfiziki sistemlərdə təhlükəsizliyin qiymətləndirilməsi, kiber təhlükəsizlik və informasiya təhlükəsizliyi arasındakı fərqlərin aydınlaşdırılması, habelə KFS-in təhlükəsizlik təhdidləri ilə mübarizənin müasir yanaşmalarını təqdim etməkdir. Eyni zamanda, kiber öldürmə zəncirinin və hücumların qarşısını alma üsullarının tədqiqi, bu sahədə mövcud məhdudiyyətlər, problemlər və gələcək tendensiyalar da müzakirə ediləcəkdir.

Məsələnin qoyuluşu

Kiberfiziki sistemlərin təhlükəsizliyi və bu sahədəki mövcud təhdidlərə qarşı mübarizə üsullarını araşdırır. Həmçinin, kiber təhlükəsizlik və informasiya təhlükəsizliyi arasındakı fərqlər, bu sahədəki məhdudiyyətlər və gələcəkdə tətbiq olunacaq yeni yanaşmalar müzakirə ediləcəkdir.

Məsələnin həlli

Kiberfiziki sistemlər (KFS) sensorlar və aktuatorların köməyi ilə fiziki dünyanı virtual hesablama dünyası ilə əlaqələndirir. Müxtəlif tərkib komponentlərindən ibarət olan KFS-lər əməkdaşlıqda global davranışlar yaradır. Bu komponentlərə real dünya ilə qarşılıqlı əlaqə yaratmaq üçün proqram sistemləri, kommunikasiya texnologiyaları, sensorlar/aktuatorlar, o cümlədən tez-tez quraşdırılmış texnologiyalar daxildir. Bu iki dünyanı birləşdirən Kiber-Fiziki Sistemlər iki mühüm elementdən ibarətdir: internet üzərindən və təyin edilmiş internet ünvanı ilə bir-biri ilə əlaqə saxlayan obyektlər və sistemlər tərəfindən yaradılmış şəbəkədən. Bu, kompüter mühitində real dünya obyektlərinin və davranışlarının simulyasiyası ilə yaradılmış virtual mühitdir.

Kiber-Fiziki Sistemlər təkcə istehsalda deyil, həm də bir çox yerlərdə mühüm rol oynayır. Onlardan bəzilərini belə sıralamaq olar: Fiziki və təşkilati iş proseslərinə nəzarət edir; Əhəmiyyətli istifadəçi əlaqəsini ehtiva edir; Real vaxtda konfiqurasiya, yerləşdirmə və ya təyinatla mühitdəki reaktiv dəyişikliklərə uyğunlaşır və təkamül edir; Öz performansını daim izləyir və optimallaşdırır; Yüksək dərəcədə etibarlılıq tələb edir; Müxtəlif texniki fənlərin və müxtəlif tətbiq sahələrinin inteqrasiyasını tələb edir.

Kiber təhlükəsizlik və informasiya təhlükəsizliyi arasındakı fərq

Kompüter şəbəkələrindən istifadənin getdikcə artması və onların həyatımızın bir çox sahələrinə daxil edilməsi, informasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsi problemini özü ilə gətirdi [3]. Bu halda kibertəhlükəsizliyin tərfi ilə birlikdə cavablandırılması lazım olan bir sual da, "İnformasiya Təhlükəsizliyi"-ni "Kibertəhlükəsizlik"-dən fərqli və ortaq cəhətlərinin nə olduğunu.

İnformasiya təhlükəsizliyi - təqdim olunan xidmətlərin, sistemlərin və məlumatların qorunmasını təmin edir.

Kibertəhlükəsizlik - kompüterlərin, məlumatların və şəbəkələrin icazəsiz rəqəmsallaşdırılmasıdır.

Bu, müxtəlif üsul və texnologiyalardan istifadə etməklə hücumların, girişin və ya məhv edilmənin qorunmasıdır.

KFS-in təhlükəsizlik təhdidləri

Təhlükəsizliyin mahiyyəti hər hansı məlumatdır. Məlumat yoxdursa, təhlükəsizlik də yoxdur. Təhlükəsizliyin təmin edilməsi üçün bütün gizli, açıq, texniki, ictimai məlumatlandırma fəaliyyətləri kəşfiyyat adlanır. İnformasiya prosesləri kiber kəşfiyyat fəaliyyəti olaraq ortaya çıxdı. Kibertəhlükə kiber kəşfiyyatın alt hissəsi kimi xüsusi təhsili olan, xüsusi texnologiya və məlumatlardan istifadə edən, elmə əsaslanan bir fəndir. Buna görə kiber kəşfiyyatda texnologiyadan istifadə edirik və buna görə də kiber təhlükə kəşfiyyatı istifadəsi olduqca vacibdir. İstifadə edilə bilən bu texnologiyalardan biri də blok zənciri texnologiyasıdır. Blockchain (blok zənciri) texnologiyası prosesləri pozmaq potensialına malikdir və istifadə etdiyi kriptografik protokollar sayəsində rədd edilməməsi və dəyişməzlik xüsusiyyətləri ilə təhlükəsizdir. Məlumatların işlənməsinin

və məlumat mənbəyinin qorunmasının daha yüksək səviyyəsinə zəmanət verir.

Kiber təhlükəsizliyin mübarizə apardığı təhdidləri beş başlıq altında nəzərdən keçirmək olar: Haktivizm; Kibercinayətkarlıq; KiberSabotaj; Kiberterrorizm; Kibermüharibə.

Kiber öldürmə zəncirinin və hücumun qarşısının alınması üsullarının tədqiqi

Kiber ölüm zənciri Amerikanın qlobal aerokosmik, müdafiə, təhlükəsizlik və qabaqcıl texnologiya şirkəti olan Lockheed-in nəticəsidir. Martin tərəfindən hazırlanmışdır. Kiber ölüm zənciri, kəşfiyyat və kompüter şəbəkələrinin müdafiəsi üçün fokuslanmış təhlükə modelidir [4].

“Ölüm Zənciri”nə görə, hədəflənmiş kiberhücum 7 mərhələdə baş verir: 1. Kəşfiyyat (**Reconnaissance**); 2. Silahlanma (Weaponization); 3. Çatdırılma (Delivery); 4. İstismar (Exploitation); 5. Quraşdırma (Installation); 6. Komanda və Nəzarət (Command & Control, C2); 7. Məqsədlər üzrə Fəaliyyətlər (Actions On Objectives).

Kəşfiyyat (Reconnaissance)

Bu, hücumçunun hədəf sistem haqqında məlumat toplama mərhələsidir. Bu mərhələnin məqsədi sistemə infiltrasiya üsullarını aşkar etməkdir. Bu mərhələdə hədəf seçimi, təşkilatın ətraflı tədqiqi, hədəfin texnologiya seçimləri, sosial şəbəkə fəaliyyətləri araşdırılır. Eyni zamanda təcavüzkarlar hədəflərinə qarşı hansı hücum üsullarının daha yaxşı olduğunu müəyyənləşdirir və təsirli olub-olmayacağını öyrənməyə çalışır.

Silahlanma (Weaponization)

Kəşfetmə mərhələsində hədəf sistemə giriş nöqtəsini təyin edən təcavüzkar bu giriş nöqtəsində hansı hücum vektorundan istifadə edəcəyinə qərar verir. Eyni zamanda istifadə ediləcək zərərli proqram da bu mərhələdə yaradılır. Bu mərhələdə müdafiəçilər silahı ol-

duğu kimi aşkar edə bilməsələr də, zərərli proqram əsərlərini təhlil edərək nəticə çıxara bilirlər. Bu analizlər adətən ən davamlı müdafiədir.

Çatdırılma (Delivery)

Zərərli proqramın hədəf sistemə göndərildiyi mərhələ. Bu mərhələdə təcavüzkar lazımı anonimliyə nail ola bilmədiyi müddətcə izlər buraxa bilər. Bu səbəblə təhlükəsizliyin ən zəif halqası olan insan nəzərə alınır və e-poçt və ya usb kimi zərərli vasitələr idarə edilir.

İstismar (Exploitation)

Təcavüzkarın silahlanma mərhələsində yaradılmış hücum vektorundan istifadə edərək hədəf sistemdəki təhlükəsizlik zəifliyindən istifadə etdiyi mərhələdir. Burada məqsəd zərərli proqramın sistemdə işləməsini təmin etməkdir [5].

Yükləmə mərhələsi ilə kompüterə endirilən fayl iş salındıqda sistemdə zəiflik yaranır. Onu istismar etməklə yükləmə mərhələsi açılacaq.

Quraşdırma (Installation)

Zərərli proqramın hədəf sistemdə qalma müddətini artırmaq üçün proqram təminatının sistemə quraşdırıldığı mərhələ. Faylların və metadataların silinməsi, möhürlər və kritik məlumatları dəyişdirə bilər ki, sanki giriş heç vaxt verilməyib.

Komanda və Nəzarət (Command & Control, C2)

Bu mərhələdə hədəf sistem tutulur. Təcavüzkar indi şəbəkənin aşağı hissəsində zərərli kodu tam manipulyasiya edə bilər. O, irəliləyən məlumat sızdırma və məhv etmə və ya xidmətdən imtina əməliyyatları həyata keçirə bilər. Bu mərhələdə quraşdırılmış hücum alətlərini idarə etmək üçün C2 kanalı qurulur.

Məqsədlər üzrə Fəaliyyətlər (Actions On Objectives)

Hədəf sistemini ələ keçirən hücumçu bu mərhələ ilə məqsədinə çatmaq üçün müxtəlif hərəkətlər edir. Bu hərəkətlərə misal olaraq məlumatların çıxarılması, silinməsi və ya başqa sistemə hücumu ola bilər.

Kiberfiziki sistemlər – fon

Bu bölmədə biz Kiberfiziki sistemlər arxitekturasını, onun əsas təbəqələrini və komponentlərini, həmçinin əsas kiberfiziki sistemlər modellərini təqdim edirik [6]. Kiberfiziki sistemlər səviyyələri kiberfiziki sistemlərin arxitekturası üç əsas təbəqədən, aşkarlama qatından, ötürücü təbəqədən və tətbiq səviyyəsindən ibarətdir.

Aşkarlama qatı: tanınma və ya aşkarlama təbəqəsi kimi də tanınır. Buraya sensorlar, aktuatorlar, kollektorlar, həmçinin radiotezliklərin identifikasiyası etiketləri, qlobal mövqələşdirmə sistemləri və müxtəlif digər cihazlar kimi avadanlıqlar daxildir. Bu cihazlar fiziki dünyanı izləmək və şərh etmək üçün real vaxt rejimində məlumat toplayır.

Ötürücü təbəqə: Həmçinin nəqliyyat qatı və ya şəbəkə qatı kimi tanınır və ikinci kiberfiziki sistem qatıdır. Bu təbəqə qavrayış və tətbiq səviyyələri arasında məlumat mübadiləsini və emalı edir.

Tətbiq səviyyəsi: Üçüncü və ən interaktiv təbəqədir. O, məlumat ötürmə səviyyəsindən alınan məlumatları emal edir, sensorlar və aktuatorlar da daxil olmaqla fiziki bölmələr tərəfindən yerinə yetirilən əməllər verir. Bu, ümumiləşdirilmiş məlumatlar əsasında mürəkkəb qərar qəbul etmə alqoritmlərinin tətbiqi ilə həyata keçirilir.

Kiberfiziki sistemlərdə məhdudiyyətlər, problemlər və gələcək tendensiyalar

Kiberfiziki sistemlər fiziki giriş və çıxışla qarşılıqlı əlaqədə olan daxili sistemlər şəbə-

kəsi kimi müəyyən edilir. Başqa sözlə, kiberfiziki sistemlər real IoT ilə əlaqəli obyektləri və prosesləri izləmək və emal etmək imkanı ilə bir-biri ilə əlaqəli bir neçə sistemin birləşməsindən ibarətdir. Kiberfiziki sistemlər üç əsas mərkəzi komponentdən ibarətdir: sensorlar, kollektorlar və aktuatorlar.

Problemin formalaşdırılması

Çoxsaylı üstünlüklərinə baxmayaraq, kiberfiziki sistemlər müxtəlif kiber və fiziki təhlükəsizlik təhdidlərinə, hücumlara və çağırışlara qarşı həssasdır. Bunun səbəbi onların heterojen təbiəti, özəl və həssas məlumatlara etibar və geniş miqyaslı paylanmasıdır. Bundan əlavə, davamlı proqram təminatı, tətbiq və əməliyyat sistemi yeniləmələri ilə təhlükəsizlik zəiflikləri minimuma endirilməlidir.

Motivasiya

Kiberfiziki sistemlərin təhlükəsizliyi sistemləri kritik infrastrukturlara (ağıllı şəbəkə, sənaye, təchizat zənciri, səhiyyə, hərbi, kənd təsərrüfatı və s.) integrasiya olunub. Bu, onları iqtisadi, cinayət, hərbi, casusluq, siyasi və müxtəlif məqsədlər üçün təhlükəsizlik hücumları üçün cəlbedici hədəfə çevirir.

Təhfələr

Bu araşdırmada biz kiberfiziki sistemlərin müxtəlif kiber-fiziki təhlükəsizlik aspektlərinin hərtərəfli nəzərdən keçirilməsini və təhlilini təqdim edirik [7].

Təhfələrə aşağıdakılar daxildir: Ümumi məlumat; Kiber-Fiziki Hücumlar; Riskin qiymətləndirilməsi; Təhlükəsizlik tədbirləri; Məhkəmə; Dərslər; Təkliflər.

Kiber təhlükəsizlik auditində Məqsədlər

Hər bir auditdə olduğu kimi, kibertəhlükəsizlik yoxlamalarının məqsədi olmalıdır. Kibertəhlükəsizlik auditinin məqsədi rəhbərliyə kibertəhlükəsizlik prosesləri, siyasətlər, prosedurlar, idarəetmə və digər nəzarət vasitə-

lərinin effektivliyini qiymətləndirməyə imkan yaratmaqdır [8].

Rəhbərliyə sistemli, elmi təminat və məsləhət xidmətləri göstərməkdir.

Auditin məqsədləri

Audit məqsədləri müəyyən edilə bilər. Bununla belə kibertəhlükəsizliklə bağlı məqsədlər aşağıdakı kimi məhdudlaşdırıla bilər:

- ✓ Kibertəhlükəsizlik siyasəti və prosedurları və onların işinin səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi ilə rəhbərliyə etibarlılıqla təmin etmək;
- ✓ Təhlükəsizlik nəzarətindəki zəifliklər səbəbindən korporativ məlumatların etibarlılığına, dəqiqliyinə və təhlükəsizliyinə təsir etməklə idarəetməyə rəhbərlik etmək;
- ✓ Cavab və bərpa proqramlarının effektivliyini qiymətləndirərək institusional yanaşmaların daxililəşdirilməsinə kömək etmək.

Biznesə təsir və risklərin qiymətləndirilməsi

Kiber insident maliyyə, əməliyyat, hüquqi və reputasiyaya təsir göstərə bilər. Təşkilatın kritik infrastrukturda rolu veb saytın potensial təsirini də artırır [9]. Kiberhücumun nəticələri baxımından nəzərə alınmalıdır. Nəticələr neqativlərə aşağıdakılar misal ola bilər:

- ✓ Əqli mülkiyyət və ya ticarət sirrinin itirilməsi;
- ✓ Kibertəhlükəsizliyə nəzarəti azaltmaq və təkmilləşdirmək üçün texnologiyaların inkişaf xərcləri;
- ✓ Vaxt və səmərəlilik itkisi.

Buna görə də kibertəhlükəsizlik auditində kiber pozuntuların iş proseslərinə təsirləri çərçivəsində riskin qiymətləndirilməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Nəticə

Məqalədə kiberfiziki sistemlərin təhlükəsizliyi və bu sahədəki mövcud təhdidlərə qarşı tətbiq olunan müasir üsulların təhlilini təqdim edir. Kiber təhlükəsizlik və informasiya təhlükəsizliyi arasındakı fərqlər aydınlaşdırılmış və kiber öldürmə zəncirinin qarşısını almaq üçün effektiv strategiyalar təqdim edilmişdir. Həmçinin, kiberfiziki sistemlərdəki məhdudiyyətlər və problemlər üzərində dayanaraq, gələcəkdə tətbiq ediləcək yeni yanaşmalar müzakirə edilmişdir. Kiber təhlükəsizlik auditini ilə bağlı məqsədlər müəyyən edilərək, bu sahədə daha da inkişaf edilməsi üçün təkliflər irəli sürülmüşdür.

Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

REFERENCES

1. **Lynn T.** (2020). Cyber-security incidents and audit quality. *European Accounting Review*, 1-28.
2. **Morgan S.** 2017 Cybercrime Report”, Cybersecurity Ventures, Herjavec Group, pp. 1-24, 2017.
3. **Al-Otaibi A.F., Alsuwat E.S.** A Study On Social Engineering Attacks: Phishing Attack, *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*, 6374-6380, 2020.

4. **Garba F.A.** The anatomy of a cyber attack: dissecting the cyber kill chain (ckc), Scientific and Practical Cyber Security Journal, 2019.
5. **Yadav T., Mallari R.A.** Technical aspects of the cyber kill chain, In International Symposium on Security in Computing and Communication, 438-452, 2016.
6. **Abbasova P.Ə.** Kiberfiziki sistemlərdə Big Data analizi // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2024, cild 16 (3), s. 81-86.
7. **Mahmoud R., Yousuf T., Aloul F., Zualkernan I.** 2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST) IEEE; 2015. Internet of things (IoT) security: current status, challenges and prospective measures; pp. 336–341.
8. **Faruque A., Abdullah M., Chhetri S.R., Canedo A., Wan J.** Acoustic side-channel attacks on additive manufacturing systems. In Proceedings of the 7th International Conference on Cyber-Physical Systems, page 19. IEEE Press, 2016.
9. **Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B.** (2019). Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control. International Journal of Production Research, 57(2), pp. 411-432.

UOT 582.259.3

DOI 10.52171/herald.304

Modeling of Fuzzy Z-Number Control System Based on Interpolation Approach Mechanism

K.A. Mammadova, A.A. Alieva

Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Kifayat Mammadova / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

Annotation

In most cases, in the modeling of fuzzy control systems, the reliability of the linguistic values of the variables in the rule base is of great importance. It is important to design the inference mechanism taking into account the reliability of the fuzzy values of the variables of the rules. For this purpose, fuzzy rules based on the Z number, which include the restrictions and reliability of information, are constructed. The interpolation of fuzzy rules is presented for the design of the inference engine of a system based on fuzzy rules. A mathematical model of a fuzzy inference system based on an interpolative mechanism is developed. A fuzzy control system with the Z number for controlling a dynamic object is modeled based on the interpolative inference mechanism. The transition process of the designed controller is compared with the transition process of a conventional fuzzy controller. The obtained comparative results demonstrate the suitability of the modeled systems in controlling dynamic objects.

Keywords: fuzzy interpolation, interpolative inference, Z-number, dynamic object, fuzzy control system.

Submitted 9 November 2024

Published 24 September 2025

For citation:

K.A. Mammadova, A.A. Alieva

[Modeling of Fuzzy Z-Number Control System Based on Interpolation Approach Mechanism]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2025, vol. 17 (3), pp. 119-130

Z ədədli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin interpolativ yanaşma mexanizmi əsasında modelləşdirilməsi

K.A. Məmmədova, Ə.Ə. Əliyeva

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Qeyri-səlis idarəetmə sistemlərinin modelləşdirilməsində əksər hallarda qaydalar bazasında dəyişənlərin lingvistik qiymətlərinin etibarlılığı mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Qaydaların dəyişənlərinin qeyri-səlis qiymətlərinin etibarlılıq dərəcəsini nəzərə alaraq nəticə çıxarma mexanizminin layihələndirilməsi əhəmiyyət kəsb edir. Bu məqsədlə məlumatın məhdudiyyət və etibarlılıq dərəcələrini özündə birləşdirən Z ədədinə əsaslanan qeyri-səlis qaydalar qurulur. Qeyri-səlis qaydalara əsaslanan sistemin nəticə çıxarma mühərrikinin layihələndirilməsi üçün qeyri-səlis qaydaların interpolasiyası təqdim olunur. İnterpolativ mexanizmə əsaslanan qeyri-səlis nəticə çıxarma sisteminin riyazi modeli işlənib hazırlanmışdır. İnterpolativ nəticə çıxarma mexanizmi əsasında dinamik obyektin idarə edilməsi üçün Z ədədli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin modelləşdirilmişdir. Layihələndirilmiş tənzimləyicinin keçid prosesi adi qeyri-səlis tənzimləyicinin keçid prosesi ilə müqayisə edilir. Alınmış müqayisəli nəticələr dinamik obyektlərin idarə edilməsində modelləşdirilmiş sistemlərin uyğunluğunu nümayiş etdirir.

Açar sözlər: qeyri-səlis interpolasiya, interpolativ nəticə çıxarma, Z ədədi, dinamik obyekt, qeyri-səlis idarəetmə sistemi

Моделирование нечеткой системы управления Z-числом на основе механизма интерполяционного подхода

К.А. Мамедова, А.А. Алиева

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)

Abstract

При моделировании нечетких систем управления надежность лингвистических значений переменных в базе правил часто имеет большое значение. Важно разработать механизм вывода с учетом степени надежности нечетких значений переменных правила. Для этого устанавливаются нечеткие правила на основе числа Z, включающего в себя степень ограничения и достоверности информации. Интерполяция нечетких правил введена для проектирования механизма вывода системы, основанной на нечетких правилах. Разработана математическая модель системы нечеткого вывода на основе интерполяционного механизма. Смоделирована система нечеткого управления по Z-числу для управления динамическим объектом на основе механизма интерполяционного вывода. Процесс переключения разработанного контроллера сравнивается с процессом переключения обычного нечеткого контроллера. Полученные сравнительные результаты демонстрируют пригодность моделируемых систем для управления динамическими объектами.

Ключевые слова: нечеткая интерполяция, интерполяционный вывод, число Z, динамический объект, нечеткая система управления.

Giriş

Müasir sənaye və digər oxşar sahələrdə bəzi dinamik qurğular, hərəkət edən obyektlər ətraf mühitin qeyri-müəyyənliyi, qeyri-dəqiqliyi və natamam informasiyalar ilə xarakterizə olunur. Bu tip dinamik obyektləri idarə etmək üçün istifadə olunan deterministik modellər adətən prosesləri adekvat təsvir etmək imkanına malik olmur. Bu obyektlərin modelləşdirilməsi və idarə edilməsinin ən səmərəli və etibarlı yollarından biri If-Then qaydalarına əsaslanan qeyri-səlis idarəetmə sistemlərindən istifadə edilməsidir. Qeyri-səlis idarəetmə sistemlərinin baza qaydaları əsasən ekspertlərin və ya təcrübəli mütəxəssislərin biliklərindən istifadə etməklə qurulur. Bəzən mütəxəssislər, yaxud da istənilən istifadəçi qeyri-müəyyən, qeyri-dəqiq, natamam informasiyalardan istifadə edərək rəşional qərar qəbul ediblər. Qeyri-səlis məntiq qeyri-müəyyən və qeyri-dəqiq bilikləri idarə etməyə imkan verir və onların əsaslandırılması üçün güclü strukturu təqdim edir. Dinamik sistemlərin modelləşdirilməsində baza qaydaların qurulması və bu qaydalar-dakı dəyişənlərin linqvistik qiymətlərinin etibarlılığının təmin olunması vacib məsələ hesab edilir. Qərar qəbuletmə modulunun layihələndirilməsi zamanı qeyri-səlis If-Then qaydalarında istifadə olunan qeyri-səlis qiymətlərin etibarlılıq dərəcəsinin nəzərə alınması böyük əhəmiyyət kəşb edir. Bu qərar qəbuletmə mexanizminin təsviri çox mürəkkəbdir. Onun simulyasiyası da çətin və çox mərhələlidir. L. Zadə etibarlılıq dərəcəsi ilə bağlı qeyri-müəyyən və qeyri-dəqiq verilənlərlə işləmək üçün Z qeyri-səlis ədədini təklif etdi. Z ədədi qeyri-səlis məhdudiyyət və etibarlılıq haqqında məlumatı təsvir edir [1]. Son zamanlarda qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi müasir dövrün müxtəlif problemlərinin həllində daha geniş şəkildə tətbiq olunur. Bu tədqiqat işlərinin əksəriyyəti tip-1 və ya tip-2 qeyri-səlis sistemlə-

rə əsaslanır. Bu tədqiqatlarda məlumatın etibarlılığı nəzərə alınır. L. Zadə tərəfindən elmə daxil edilən Z ədədləri qeyri-səlis məhdudiyyəti və qeyri-səlis idarəetmə sisteminin etibarlılığını ifadə etməyə imkan verir. Z ədədlərinə əsaslanan sistemlər bir çox tədqiqat işlərində geniş müzakirə edilmiş və layihələndirilmişdir [1-2]. Klassik qeyri-səlis çoxluqla müqayisədə Z ədədli qeyri-səlis çoxluq insan biliyini daha adekvat təsvir edir. Belə ki, insan hər hansı bir fikri söyləyərkən, onun həm doğruluq, həm də inam dərəcəsini intuisiyasına görə müəyyən-ləşdirməyə çalışır. Fikrin inam dərəcəsi onun nə qədər doğru olması ehtimalını ifadə edir. Məsələn, əgər ekologiyanın çirklənməsi ehtimalının yüksək olmasını təsdiqləyən səbəb varsa, onda burada iki cür qeyri-müəyyənlik meydana gəlir. Birincisi ekologiya nə dərəcədə çirklidir, ikincisi isə bu fikrin yaranma səbəbi nə dərəcədə doğrudur. Əslində $[0,1]$ parçasında verilən ehtimalın özü də qeyri-səlis ədəddir. Odur ki, insanın hər bir fikrinin iki istiqamətdə qeyri-müəyyənlik ölçüsü mövcuddur. Bunlardan biri fikrin doğruluq dərəcəsi, digəri isə fikrin doğruluq dərəcəsinə əminlik dərəcəsidir. Bu dərəcələrin hər ikisini qeyri-səlis ədədlərlə təsvir etmək mümkündür. Z-ədədi bu iki qeyri-səlis ədəddən ibarət olan bir vektordur. Təklif olunan nəzəriyyə informasiyanın həm məhdudiyyətini, həm də etibarlılığını təsvir edə bilər [1].

Müasir ədəbiyyatlarda qeyri-səlis nəticə çıxarma sistemlərinin tətbiqi ilə mürəkkəb qeyri-xətti problemlərin sadə, lakin effektiv həllini təmin edir [3]. Verilənlərin həcmindən asılı olmayaraq tədqiqat oblastında qeyri-bərabər paylana biləcəyini nəzərə alsaq, klassik qeyri-səlis nəticə çıxarma sistemlərinin çox seyrək, çox mürəkkəb yaxud da balanssız qaydalar bazasına malik olarsa çətinlik yarana bilər. Qeyri-səlis interpolasiya isə bu problemi həll edir. O, seyrək qayda bazası verilmiş gi-

rişi əhatə etmədikdə, seyrək qayda bazaları ilə qeyri-səlis nəticələr çıxarmağa imkan verir və müəyyən qaydaları qonşu olanlarla yaxınlaşdıraraq çox sıx qayda əsaslarını sadələşdirir. Bu işdə qeyri-səlis interpolyasiya yanaşmalarının müxtəlif növləri və onların variasiyaları həm interpolyasiya mexanizmi (çıxarma mexanizmi), həm də seyrək qaydalar bazasının yaradılması baxımından sistematik şəkildə nəzərdən keçirilir. İdarəetmə sahəsində qeyri-səlis interpolyasiyanın representativ tətbiqləri nəzərdən keçirilir. Qeyri-səlis interpolyasiya yanaşmalarının effektivliyi və daha geniş tətbiq potensialı təqdim edilir.

Hazırda Z ədədi anlayışı geniş araşdırılır və müxtəlif məsələlərin həllində tətbiq edilir. [2, 3]-də Z ədədlərindən istifadə edilərək çoxmeyarlı qərar qəbul etmə məsələsinin həllinə baxılmışdır. Lakin bu tədqiqatlarda təklif olunan yanaşma [4]-də təqdim olunan yanaşma əsasında Z ədədinin qeyri-səlis ədədlərə çevrilməsinə əsaslanır. [5]-də çoxmeyarlı qərar qəbul etmək üçün Z ədədindən istifadə edilir. Burada Z ədədi qeyri-müəyyənlik yolu ilə interval qeyri-səlis çoxluğa çevrilir və sonra mərkəzin hesablanması ilə qərar qəbul etmək üçün dəqiq ədədlərə çevrilir. Bu tədqiqatçılar təqdim olunan yanaşmanın üstünlüklərini tədqiqatın hesablama mürəkkəbliyinə əsaslanaraq təqdim edirlər.

Lakin, Z ədədlərinin səlis ədədlərə çevrilməsi xeyli informasiya itkisinə səbəb ola bilər. Buna görə də belə çevrilmə, layihə edilmiş dinamik obyektin, qeyri-səlis idarəetmə sisteminin işinə təsir göstərə bilər. Məqalə [6]-də təbii dillə daxil edilən informasiyanın qeyri-müəyyənliyinin qavranılmasında Z ədədindən istifadə və insana effektiv perspektivlərini sözlərlə hesablama ilə (CWW) birləşdirmək təklif edilir. [7]-də AHP (Analytical Hierarchy Process)-yə Z ədədinə əsaslanan yanaşmanın tətbiqi nəzərdən keçirilir. Təqdim olunan bu iş də

[4]-də təklif olunan yanaşmaya əsaslanır. [8]-də təklif edilən intervalla, qeyri-səlis və qeyri-müəyyənliyə malik Z ədədinə əsasən qərar qəbul etmə üçün ədalətli qiymət yanaşması nəzərdən keçirilir. Z ədədlərindən istifadə etməklə arifmetik əməliyyatlar və qərarların qəbulu üzrə bir sıra tədqiqat işləri yerinə yetirilmişdir. Qərarların qəbulu, idarəetmə və modelləşdirmədə Z ədədlərinin tətbiqi layihə edilmiş sistem üçün səmərəli nəticə çıxarma mexanizmindən istifadə etməlidir. Müəlliflər [9]-də nəticə çıxarma prosesində Z interpolyasiyasından istifadə etməyi təklif edirlər. Koçzi və Hirota seyrək qeyri-səlis qaydalar bazasında interpolyativ mülahizəni məqsəd kimi qoydular [10]. Bu üsul *modus ponens*-in məntiqi şərhini saxlayır. Metod məsafəyə əsaslanan təxmini qeyri-səlis əsaslandırma [10, 11]. Qeyri-səlis çoxluqlar üçün çoxlu müxtəlif məsafə yanaşmaları mövcuddur. Bunlara mütləq məsafə, Evklid məsafəsi, uyğunsuzluq ölçüsü, Hausdorff ölçüsü və Kaufman və Qupta ölçüsü daxildir. [11]-də bu ölçülərin əsas çatışmazlığı kimi qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyasının forması haqqında məlumatın daha çox itirilməsi kimi təqdim edilir. İki qeyri-səlis A və B çoxluğu üçün məsafə ölçüsündən istifadə edərək qeyri-səlis $\tilde{A}$ çoxluğu verildikdə, ikinci qeyri-səlis $\tilde{B}$ çoxluğunu qurmaq mümkün deyil. İşdə qeyd edilir ki, bu problemi həll etmək üçün Koczi ölçüsündən istifadə edilə bilər. Koczi məsafəsi iki qeyri-səlis çoxluğun α -kəsiklərinə əsaslanır. Koczu ölçüsündən istifadə edilərək qeyri-səlis interpolyativ əsaslandırma təklif edilmişdir. İnterpolyativ təxmini əsaslandırma müxtəlif məsələlərin həllinə tətbiq edilmişdir. Bu işlərdə Z ədədinə əsaslanan qeyri-səlis qaydalar üçün interpolyativ təxmini əsaslandırmanın əldə edilməsi nəzərdən keçirilir. Daha sonra təklif edilmiş metod dinamik idarəetmə sisteminin modelləşdirilməsinə tətbiq edilir. Məqalədə dinamik

qurğunun idarəetmə sisteminin layihələndirilməsində Z ədədləri üçün interpolativ təxmini əsaslandırma tətbiq edilmişdir.

Qeyri-səlis qaydaların interpolasiyası

Qeyri-səlis qaydaların interpolasiyası (QSQİ), qeyri-səlis qaydalar bazası ilə işləyən sistemlərdə natamam və ya qeyri-dəqiq qaydalar arasında nəticələr əldə etmək üçün istifadə edilən bir texnikadır. QSQİ, qaydalar arasında ki boşluqları dolduraraq nəticə çıxarmağa imkan verir. Bu metod, klassik qeyri-səlis əsaslandırmanın mümkün olmadığı hallarda tətbiq edilir. QSQİ-nin tətbiqində məqsəd, qeyri-səlis qaydalar bazasında müəyyən giriş verilənlərinə uyğun dəqiq nəticələr əldə etmək, tam qaydalar bazası olmayan hallarda interpolasiya yolu ilə nəticələri təxmin etməkdir. QSQİ, qeyri-səlis məntiqin daha geniş tətbiq sahələrində uğurla istifadə edilən güclü bir metod olub, informassiyaların məhdud, natamam, qeyri-dəqiq olduğu hallarda daha səmərəli nəticələr əldə etməyə imkan verir. QSQİ bir sıra üstünlüklərə malikdir, belə ki, o, natamam qaydalar bazası ilə işləyə bilər, hətta giriş verilənləri dəqiq olmadıqda belə nəticə çıxara bilər, daha elastikdir və reallıqda rast gəlinən qeyri-müəyyənlikləri idarə etməyə imkan verir.

Məqalədə qeyri-müəyyən məlumatları emal etmək və layihələndirilən sistemlərin məhsuldarlığını artırmaq üçün müxtəlif qeyri-səlis əsaslandırma üsullarından istifadə edilir. Bu qeyri-səlis mülahizə üsulları, əsasən kompozisiya üzrə nəticə çıxarma qaydasına, analogiya və oxşarlığa əsaslanır. Qeyri-səlis məntiqin nəticə çıxarma texnikası bir növ insanın düşünmə qabiliyyətinə oxşayır.

Bu əsaslandırma metodlarının sürəti, emal imkanları və mürəkkəbliyi mühüm məsələlərdir. Bu işdə, qaydaların qeyri-səlis interpolasiyasına əsaslanan nəticədən istifadə olu-

nur. Qeyri-səlis qaydaların interpolasiyası Koczi və Hirota [10, 11] tərəfindən təklif edilir və seyrək qaydalar bazasında istifadə üçün nəzərdə tutulmuşdur. Məntiqi nəticə çıxarma mexanizmi aşağıdakı şərtlərin yerinə yetirilməsini tələb edir: istifadə olunan qeyri-səlis çoxluqlar davamlı, qabarıq və məhdud dəstəkli normal olmalıdır. Təklif olunan nəticə çıxarma metodu məsafə ölçüsünə əsaslanır. Burada iki qeyri-səlis çoxluğun məsafə ölçüsü $[0,1]$ intervalında müəyyən edilmiş qeyri-səlis çoxluqdan istifadə etməklə təsvir edilir. İstifadə olunan məsafə ölçüsü α -kəsiyə əsaslanır.

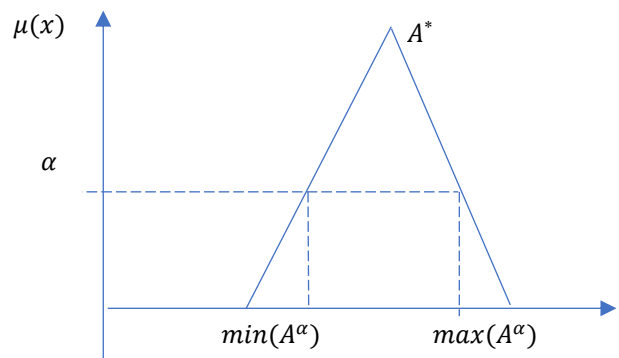
İki qeyri-səlis A_1 və A_2 çoxluğu üçün istifadə olunan bəzi anlayışları yada salaq. A_1 və A_2 qeyri-səlis çoxluqların α -kəsiyi A_1^α və A_2^α kimi işarələyək.

Belə qəbul edək ki, A_1 qeyri-səlis çoxluğu A_2 qeyri-səlis çoxluğundan kiçikdir; yəni $A_1 < A_2$, əgər

$$\min\{A_1^\alpha\} < \min\{A_2^\alpha\} \quad (1)$$

$$\sup\{A_1^\alpha\} < \sup\{A_2^\alpha\}, \quad (2)$$

burada, $\min\{A_1^\alpha\}$ və $\min\{A_2^\alpha\}$ A_1 və A_2 -nin α -kəsiyinin minimumudur; $\max\{A_1^\alpha\}$ və $\max\{A_2^\alpha\}$ isə A_1 və A_2 -nin α -kəsiyinin maksimumudur (şəkil 1). Aşağıdakı halı nəzərdən keçirək.



Şəkil 1 – A_1 və A_2 qeyri-səlis çoxluqların α -kəsiyi üçün üçbucaq mənsubiyyət funksiyası, infimum və maximum, interpolasiya və məsafə anlayış

Figure 1 – Triangular membership function for the α -section of fuzzy sets A_1 and A_2 , minimum and maximum, interpolation and distance concepts

Fərz edək ki, tənzimləyici üçün qeyri-səlis qaydalar bazamız var. Müşahidə nəticəsində X giriş dəyişəninin A^* olduğunu aşkar edirik. Qaydaya əsaslanan dinamik sistemin məhsuldarlığını müəyyən etmək məqsədilə fərz edək ki, A^* qeyri-səlis A_1 və A_2 çoxluqları arasında yerləşir. A_1 və A_2 qeyri-səlis çoxluqlarını təsvir edən qaydalardan istifadə edərək qeyri-səlis sistemin çıxışını müəyyən edək.

X -in A^* olduğunu və A^* -nin qeyri-səlis A_1 və A_2 çoxluqları arasında yerləşməsinə, Y çıxış dəyişəninin B^* olduğunu nəzərə alsaq, aşağıdakı qaydanı yaza bilərik:

Əgər $X A_1$ -dirsə, Onda $Y B_1$ -dir;

Əgər $X A_2$ -dirsə, Onda $Y B_2$ -dir.

Nəticənin tapılması: $Y = B^*$?

(B^* qeyri-səlis B_1 və B_2 çoxluqları arasında yerləşir).

Əgər $A_1 < A^* < A_2$ və $B_1 < B_2$ olarsa, xətti interpolasiyadan [10] istifadə edərək (3) ifadəsini yaza bilərik:

$$\frac{d(A^*, A_1)}{d(A^*, A_2)} = \frac{d(B^*, B_1)}{d(B^*, B_2)} \quad (3)$$

Burada $d(*)$ iki qeyri-səlis çoxluq arasındakı məsafədir. Hamming məsafəsi, Evklid məsafəsi, Hausdorff məsafəsi və Kaufman-Gupta məsafəsi düsturlarından istifadə edərək iki çoxluq arasındakı $d(*)$ məsafəsini hesablamaq mümkündür. Bunlar aşağıdakılardır:

$$d(X, Y) = |X - Y|;$$

$$d(X, Y) = \sqrt{(X - Y)^2};$$

$$d(X, Y) = \max \left\{ \max_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \max_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x, y) \right\} \quad (4)$$

$$d(X, Y) = \frac{(|x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|)}{2(\beta_2 - \beta_1)}$$

A və B çoxluqları müvafiq olaraq $[a_1, a_2]$

və $[b_1, b_2]$ intervallarında təyin olunur. $[\beta_1, \beta_2]$ həm A -nın, həm də B -nin dəstəyidir. İstinad [9-11]-də qeyd edilir ki, bu məsafə ölçüləri forma haqqında məlumat vermir. Qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyalarının. Koczy və Hirota [10,11] iki qeyri-səlis çoxluğun α -kəsikləri əsasında məsafəni təqdim etdilər. Bu məsafədən istifadə edərək son qeyri-səlis çoxluğu asanlıqla qurmaq olar. Koczy və Hirota [10, 11] α -cut hesablanmış aşağı d_L və yuxarı d_U A_1^α və A_2^α arasındakı məsafələrə əsasən:

$$d_L(A_1^\alpha, A_2^\alpha) = d(\min\{A_1^\alpha\}, \min\{A_2^\alpha\}); \quad (5)$$

$$d_U(A_1^\alpha, A_2^\alpha) = d(\max\{A_1^\alpha\}, \max\{A_2^\alpha\});$$

harada ki,

$$d_L(A^{\alpha*}, A_1^\alpha) = d(\min\{A^{\alpha*}\}, \min\{A_1^\alpha\}) = \min\{A^{\alpha*}\} - \min\{A_1^\alpha\};$$

$$d_U(A^{\alpha*}, A_2^\alpha) = d(\max\{A^{\alpha*}\}, \max\{A_2^\alpha\}) = \max\{A^{\alpha*}\} - \max\{A_2^\alpha\} \quad (6)$$

$$d_L(B^{\alpha*}, B_1^\alpha) = d(\min\{B^{\alpha*}\}, \min\{B_1^\alpha\}) = \min\{B^{\alpha*}\} - \min\{B_1^\alpha\};$$

$$d_U(B^{\alpha*}, B_2^\alpha) = d(\max\{B^{\alpha*}\}, \max\{B_2^\alpha\}) = \max\{B^{\alpha*}\} - \max\{B_2^\alpha\};$$

Məsafələri ölçmək üçün Hamming və ya Evklid düsturlarından (5) istifadə oluna bilər. (5)-ifadəsini (3)-də nəzərə alsaq, aşağıdakıları əldə edə bilərik:

$$\min\{B^{\alpha*}\} = \frac{\left(\frac{1}{d_L^\alpha(A_1^\alpha, A^{\alpha*})}\right) \min\{B_1^\alpha\} + \left(\frac{1}{d_L^\alpha(A_2^\alpha, A^{\alpha*})}\right) \min\{B_2^\alpha\}}{\frac{1}{d_L^\alpha(A_1^\alpha, A^{\alpha*})} + \frac{1}{d_L^\alpha(A_2^\alpha, A^{\alpha*})}} \quad (7)$$

$$\max\{B^{\alpha*}\} = \frac{\left(\frac{1}{d_U^\alpha(A_1^\alpha, A^{\alpha*})}\right) \max\{B_1^\alpha\} + \left(\frac{1}{d_U^\alpha(A_2^\alpha, A^{\alpha*})}\right) \max\{B_2^\alpha\}}{\frac{1}{d_U^\alpha(A_1^\alpha, A^{\alpha*})} + \frac{1}{d_U^\alpha(A_2^\alpha, A^{\alpha*})}}$$

Sonra hər α üçün növbəti addımda müəyyən edilmiş çıxış α -səviyyəsi

$$B^{\alpha*} = [\min\{B^{\alpha*}\}, \max\{B^{\alpha*}\}] \quad (8)$$

olacaq.

k sayda qaydalar üçün (7) düsturu genişləndirildi.

$$\min\{B^{\alpha*}\} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_L^{\alpha}} (A_i^{\alpha}, A^{\alpha*}) \right) \min\{B_i^{\alpha}\}}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_L^{\alpha}} (A_i^{\alpha}, A^{\alpha*}) \right)} \quad (9)$$

$$\max\{B^{\alpha*}\} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_L^{\alpha}} (A_i^{\alpha}, A^{\alpha*}) \right) \max\{B_i^{\alpha}\}}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_L^{\alpha}} (A_i^{\alpha}, A^{\alpha*}) \right)}$$

Növbəti addımda Z ədədlərinə əsaslanan qeyri-səlis sistemin çıxışını əldə etmək üçün yuxarıdakı düsturları tətbiq edirik.

Z ədədlərə əsaslanan qeyri-səlis qaydalar-dan istifadə edərək interpolativ əsaslan-dırma

Z ədədinə əsaslanan If-Then qaydalarını və onun nəticə çıxarma mexanizmini nəzərdən keçirək. Fərz edək ki, çox girişli tək çıxışlı qeyri-səlis Z qaydaları aşağıdakı kimi verilir.

Z ədədinə əsaslanan If-Then qaydalar bazası aşağıdakı kimidir:

$$\begin{aligned} &\text{Əgər } x_1 (A_{11}, R_{11})\text{-dirsə və ... və} \\ &x_m (A_{1m}, R_{1m})\text{-dirsə, Onda } y (B_1, R_1)\text{-dir.} \\ &\text{Əgər } x_1 (A_{21}, R_{21})\text{-dirsə və ... və } x_m (A_{2m}, R_{2m})\text{-dirsə,} \\ &\text{Onda } y (B_2, R_2)\text{-dir.} \\ &\text{Əgər } x_1 (A_{n1}, R_{n1})\text{-dirsə və ... və } x_m (A_{nm}, R_{nm})\text{-} \\ &\text{dirsə, Onda } y \rightarrow (B_n, R_n)\text{-dir.} \end{aligned} \quad (10)$$

Z ədədlərinə əsaslanan qeyri-səlis siste-min nəticə çıxarma prosesinə interpolasiya yanaşmasının tətbiqini nəzərdən keçirək. İlk iterasiyada α -səviyyədə istifadə edərək gələn giriş siqnalları və əvvəlki hissələrdə dəyişən-lərin qeyri-səlis qiymətləri arasındakı fərqlər hesablanır. Bu məqsədlə α -kəsiklərini Hamming, Evklid və ya (4)-də verilmiş məsa-fələrdən biri ilə hesablamaq olar. Məsafələr əvvəli hissədə məhdudiyyət və etibarlılıq dəyişənləri üçün ayrıca hesablanacaq. Burada mənsubiyyət funksiyasının aşağı və yuxarı sərhədlərini tapmaq üçün (5) və (6)

düsturlarından istifadə olunur. (9) düsturundan istifadə edərək məsafələr tapıldıqdan sonra növbəti addımda qeyri-səlis çıxış siqnalının aşağı və yuxarı sərhədlərini hesablanır. Bu əməliyyatları aşağıdakı düsturlarla da ifadə etmək olar. α -kəsiklər vasitəsilə aşağı və yuxarı hissələri əldə edə bilərik. Bu məqsədlə ilk təkrarlama məsafələr (11) kimi hesablanır:

$$\begin{aligned} d_L (A_{X_{ij}}^{\alpha}, X_j^{\alpha}) &= |A_{X_{ij}}^{\alpha} - X_j^{\alpha}| \\ d_i^{\alpha} &= \sum_{j=1}^m d_L (A_{X_{ij}}^{\alpha}, X_j^{\alpha}), \end{aligned} \quad (11)$$

burada, $j = \overline{1, m}$ olmaqla, giriş siqnallarının, $i = \overline{1, n}$ qaydaların sayını ifadə edir.

Xüsusi hal üçün $\alpha = \{0, 1\}$. $d_L (A_{X_{ij}}^{\alpha}, X_j^{\alpha})$ – iki qeyri-səlis çoxluq arasın-dakı məsafədir. (11) düsturu A məhdudiyyət parametri üçün dc_i^{α} məsafəsini tapmaq üçün istifadə olunur. Eyni zamanda etibarlılıq parametri üçün dr_i^{α} məsafəsini tapmaq üçün eyni düsturdan istifadə oluna bilər. Ümumi məsafə, məhdudiyyət və etibarlılıq üçün hesablanmış iki məsafənin cəmi olacaq:

$$d_i^{\alpha} = dc_i^{\alpha} + dr_i^{\alpha} \quad (12)$$

Burada dr_i^{α} etibarlılıq parametri üçün hesablanmış məsafədir. Qaydanın çıxışında qeyri-səlis çoxluq aşağıdakı tənlikdən istifadə etməklə hesablanır.

$$(Y^{\alpha}, R_Y^{\alpha}) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^{\alpha}} \right) (B_{Y,i}, R_{Y,i})^{\alpha}}{1 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^{\alpha}} \right)} \quad (13)$$

Çıxış qeyri-səlis çoxluqlarda $\inf$, $\max$ və mərkəz qiymətlərini tapmaq üçün (13) tətbiq edilir. (13)-də d_i^{α} -nın qiymətini (11) nəzərə alsaq, (14) düsturunu əldə edə bilərik:

$$(Y^{\alpha}, R_Y^{\alpha}) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^m d_L (A_{X_{ij}}^{\alpha}, X_j^{\alpha})} \right) (B_{Y,i}, R_{Y,i})^{\alpha}}{1 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^m d_L (A_{X_{ij}}^{\alpha}, X_j^{\alpha})} \right)} \quad (14)$$

(14)-dən istifadə edərək sistemin çıxış Z qeyri-səlis siqnalını əldə edə bilərik. Qeyd etmək lazımdır ki, çıxış siqnalını tapmaq üçün B_{Yi} ; etibarlılığı tapmaq üçün R_{Yi} dəyişənlə-

rindən istifadə edirik. Çıxış siqnalları alındıqdan sonra Z ədədinin qeyri-səlis ədədə çevrilməsi əməliyyatı yerinə yetirilir.

[4, 5]-də verilmiş

$$Y = [(Y_l + 4 \cdot Y_m + Y_r) / 6] \cdot [(R_{Yl} + 4 \cdot R_{Ym} + R_{Yr}) / 6]$$

düsturu çıxış siqnalının qeyri-səlis qiymətini idarə etmək üçün istifadə olunur. Burada Y qeyri-səlis çıxış qiyməti, R_Y isə etibarlılıqdır. Qeyd etmək lazımdır ki, qaydalar bazasının əvvəlki və sonrakı hissələrində giriş və çıxış parametrləri üçün üçbucaq tipli qeyri-səlis çoxluqlardan istifadə edirik.

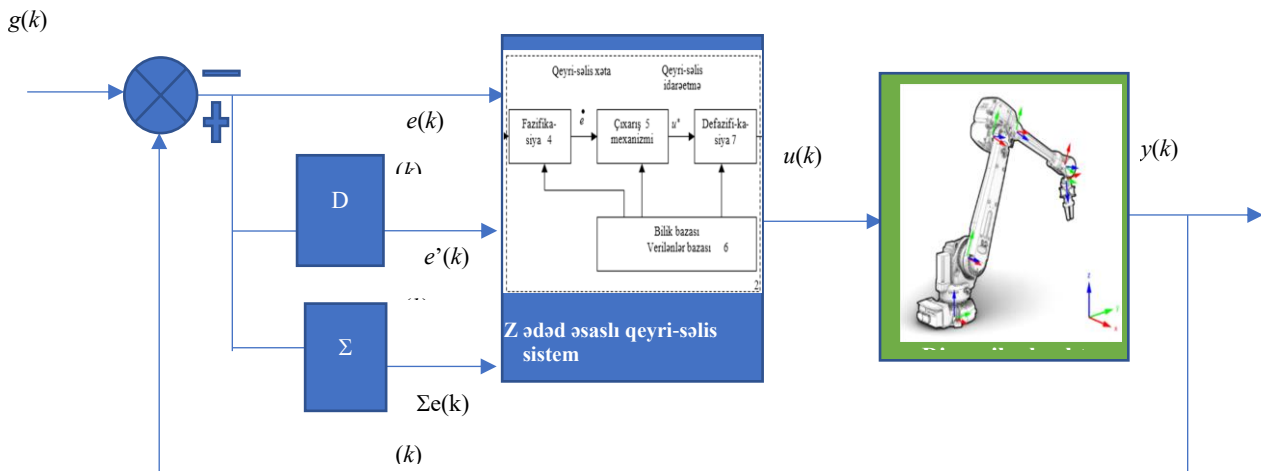
Simulyasiya tədqiqatları: Dinamik obyektin idarə edilməsi

Sənayedə bir çox dinamik qurğular qeyri-müəyyən bir mühitdə işləyir və məlumatın qeyri-səlisliyi ilə xarakterizə olunur. Bu dinamik qurğular struktur və parametrlərlə bağlı qeyri-müəyyənliklərlə

xarakterizə olunur.

Deterministik modellər bu dinamik qurğuları adekvat şəkildə təsvir edə bilmir və bu modellərdən istifadə etməklə tələb olunan idarəetməni əldə etmək çətin olurdu. İdarəetmə sistemlərinin qurulması üçün qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsiindən istifadə problemin həlli üçün dəyərli seçim ola bilər. Bu məqalədə dinamik qurğuların idarə edilməsi üçün yuxarıdakı bölmədə təsvir edilən qeyri-səlis Z ədədlərinə əsaslanan idarəetmə sistemindən istifadə olunur. Təklif olunan qeyri-səlis Z ədəd əsaslı idarəetmə sisteminin strukturu şəkil 2-də verilmişdir.

Bu strukturda qurğunun çıxış siqnalı $y(k)$ və təyin edilmiş hədəf siqnalı $g(k)$ arasındakı fərq $e(k)$ xəta siqnalı ilə müəyyən edilir. $e(k)$ - xəta qiymətindən istifadə edərək xətanın dəyişmə sürəti $e'(k)$ və xətanın $\sum e(k)$ cəmi müəyyən edilir.



Şəkil 2 – Z ədəd əsaslı idarəetmə sisteminin strukturu

Figure 2 – Structure of a Z -number-based control system

Şəkildə D - fərq əməliyyatını, Σ - inteqrasiyanı ifadə edir. Bu giriş siqnallarından istifadə edərək, qapalı dövrəyə malik idarəetmə sistemi üçün qeyri-səlis Z ədəd əsaslı sistemdən – qeyri-səlis tənzimləyicidən istifadə olu-

nur.

If-Then formasına malik olan biliklər bazası qeyri-səlis tənzimləyicinin nüvəsi hesab edilir. Qeyri-səlis idarəetmə sisteminin dəqiqliyi giriş dəyişənlərindən, eləcə də ekspert bi-

liklərindən və mənsubiyyət funksiyasının növündən asılıdır. Ona görə də onların seçilməsinə xüsusi diqqət göstərmək çox vacibdir.

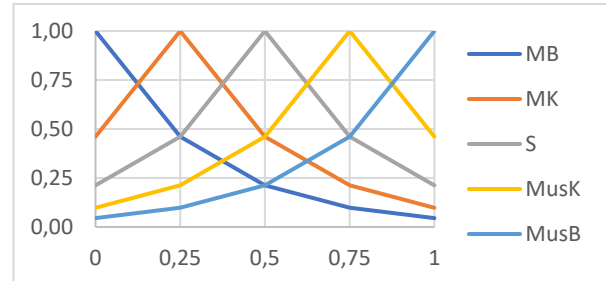
If-Then qaydalarının əvvəlki hissəsinə giriş signalı ($g(k)$) daxildir və qaydaların sonrakı hissəsinə isə qurğuya tətbiq olunacaq idarəetmə signalıdır ($u(k)$).

Təhlillər göstərdi ki, dinamik qurğularda idarəetmə əsasən giriş dəyişənləri xətası ($e(k)$) və xəta sürətindən ($e'(k)$) istifadə etməklə həyata keçirilir. İlk iterasiyada bu parametrlərdən istifadə etməklə If-Then formasına malik olan biliklər bazası hazırlanır. Biliklər bazasında If-Then qaydaları giriş parametrləri ilə çıxış idarəetmə signalı arasındakı əlaqəni təsvir edir. Dinamik obyektlərin təhlili əsasında giriş-çıxış asılılığını təsvir edən BB (Biliklər Bazası) tərtib edilmişdir. Xəta ($e(k)$) və xətanın dəyişmə sürətindən ($e'(k)$) istifadə etməklə idarəetmə signalının müvafiq qiyməti müəyyən edilir.

BB-nin qurulması zamanı daxil olan giriş-çıxış dəyişənləri linqvistik qiymətlərlə təsvir edilir. Üçbucaq mənsubiyyət funksiyasından istifadə etməklə dəyişənlərin linqvistik qiymətləri hesablanır. Linqvistik qiymətlər üçün üçbucaq mənsubiyyət funksiyasının layihələndirilməsi zamanı hər bir giriş parametrinin mühakimələr universumu və linqvistik dəyişənlərin qiyməti müəyyən edilir.

Problemin həllindən asılı olaraq mənsubiyyət funksiyalarının sayı təyin edilir. Məsələn, tutaq ki, problemin həlli üçün seçilən linqvistik dəyişənlərin qiymətlər sayı beşə bərabərdir. Giriş parametrlərinin, məsələn, xəta və xətanın dəyişmə sürətinin aldığı linqvistik qiymətlər Mənfi Böyük (MB), Mənfi Kiçik (MK), Sıfır (S), Müsbət Kiçik (MüsK), Müsbət Böyük (MüsB) kimi işarələnir. Çıxış parametrinin, yəni çıxış signalının aldığı linqvistik qiymətlər Kiçik (K), Normal (N), Böyük (B) kimi işarələnir. Giriş-çıxış parametrlərinin $[0;100]$ ara-

lığında miqyaslandığını qəbul edək. Giriş və çıxış parametrlərinin mənsubiyyət funksiyalarının qrafik təsviri şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 3 – Giriş-çıxış parametrlərinin mənsubiyyət funksiyası

Figure 3 – Membership functions of input-output variables

Hər bir parametrlər üçün mənsubiyyət funksiyaları müəyyən edildikdən sonra qeyri-səlis If-Then qaydalarının qurulması həyata keçirilir. Hər bir qayda iki girişli və bir çıxışlı dəyişənlərə malikdir [11,12].

Cədvəl 1 giriş parametrləri, xəta və xətanın dəyişmə sürəti, çıxış parametri və tənzimləyicinin idarəetmə signalı arasındakı əlaqələri təsvir edir.

Cədvəldən istifadə edərək qeyri-səlis idarəetmə qaydaları əldə edə bilərik. Aşağıda, cədvəl 1-dən istifadə etməklə qaydalar bazasının kiçik bir fragmenti qurulmuşdur.

$$\left. \begin{array}{l} \text{ƏGƏR } e \text{ xətası (MB, U) VƏ dəyişmə xətası } e' \text{ (MB, U)} \\ \quad \text{ONDA İdarəetmə signalı (Y, U)} \\ \text{ƏGƏR } e \text{ xətası (Z, U) VƏ dəyişmə xətası } e' \text{ (MüsK, U)} \\ \quad \text{ONDA İdarəetmə signalı (A, U)} \\ \quad \vdots \\ \text{ƏGƏR } e \text{ xəta (MüsK, U) VƏ dəyişmə xətası } e' \text{ (MB, U)} \\ \quad \text{ONDA İdarəetmə signalı (Y, U)} \end{array} \right\} (15)$$

Cədvəl 1 – Ekspert biliyi

Table 1 – Expert knowledge

U idarəetmə signalı	e' xətanın dəyişmə sürəti					
		MB,U	MK,U	S,U	MüsK,U	MüsB,U
e xəta	MB,U	Y,U	Y,U	Y,U	A,U	N,U
	MK,U	Y,U	Y,U	A,U	N,U	A,U
	S,U	Y,U	A,U	N,U	A,U	A,U
	MüsK,U	A,U	N,U	A,U	A,U	A,U
	MüsB,U	N,U	A,U	A,U	A,U	A,U

Qaydalar bazasından istifadə edərək Z ədədlərinə əsaslanan təqdim olunmuş qeyri-səlis sistem dinamik obyektlərin idarə edilməsi üçün tətbiq edilmişdir. Layihələndirilmiş sistem performansının məqbul olub olmadığını yoxlamaq üçün idarəetmə modellərindən istifadə etməklə kifayətlənir. Z ədədinə əsaslanan qeyri-səlis tənzimləyici aşağıdakı düsturla verilmiş dinamik qurğunun idarə edilməsi üçün tətbiq edilir [10].

$$y(k) = \frac{y(k-1)y(k-2)(y(k-1) + 2.25)}{(1 + y(k-1)^2 + y(k-2)^2)} + u(k), (16)$$

burada, $y(k-1)$, $y(k-2)$ dinamik qurğunun bir və iki pilləli gecikmiş çıxışı, $u(k)$ isə girişin idarəetmə signalıdır.

Tətbiq edilən signalın müxtəlif qiymətlərindən istifadə etməklə dinamik qurğunun idarə edilməsi həyata keçirilir. 100 iterasiyalı istinad signalının riyazi ifadəsi aşağıdakı kimi verilir (17):

$$K = \begin{cases} 1, & 0 \leq k < 25 \\ 5, & 25 \leq k < 50 \\ 10, & 50 \leq k < 75 \\ 15, & 75 \leq k < 100 \end{cases} (17)$$

Məqalədə keyfiyyət meyarı kimi orta-kvadrat xətdən (OKX) istifadə olunur [10].

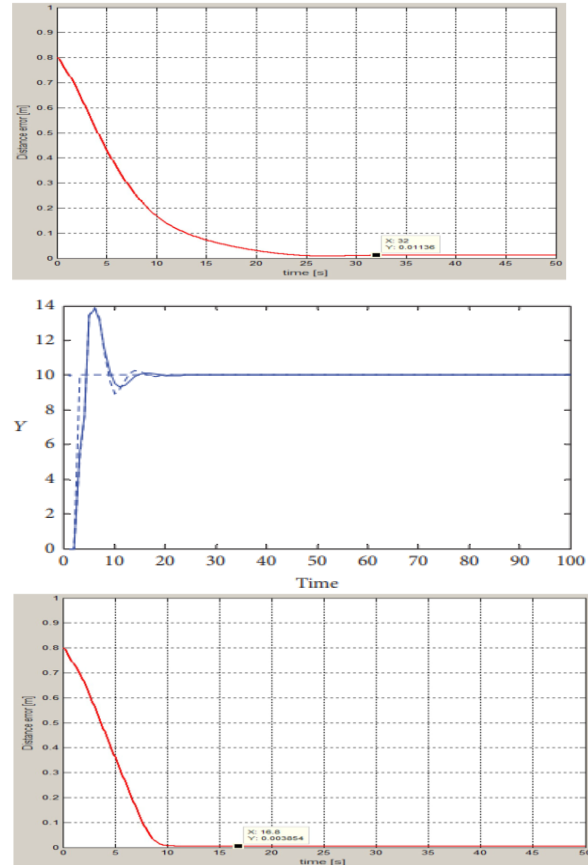
$$OKX = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (y_i^d - y_i)^2}{K}} (18)$$

Burada, K iterasiyaların ümumi sayıdır. Xətanın Orta Kvadratik Kökü (XOKK) model tərəfindən proqnozlaşdırılan qiymətlər (y_i^d) və müşahidə edilən faktiki qiymətlər (y_i) arasındakı fərqi ölçmək üçün çox istifadə edilən metrikdir. Bu, daha yaxşı model performansını göstərən daha aşağı XOKK qiymətləri ilə proqnozlaşdırılan modelin düzgünlüyünün göstəricisini təmin edir.

Dinamik obyekt (16) üçün qeyri-səlis Z ədədinə əsaslanan idarəetmə sisteminin simulyasiyası aparılmışdır. Z ədədli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin performansını eyni ilkin

şərtlərdən istifadə edərək adi qeyri-səlis idarəetmə sisteminin performansını ilə müqayisə edilir.

Şəkil 4-də adi qeyri-səlis və Z ədədlərinə əsaslanan idarəetmə sisteminin keçid prosesi əyrisi təsvir edilmişdir.



Şəkil 4 – Adi və Z ədədlərinə əsaslanan idarəetmə sisteminin keçid xarakteristikaları

- a) Səlis tənzimləyicili dinamik qurğunun məsafə xətası
- b) Qeyri-səlis tənzimləyicili dinamik qurğunun məsafə xətası
- c) Z ədədinə əsaslanan (bütöv xətti əyri) və adi qeyri-səlis (qırıq xətti əyri) tənzimləyicinin keçid prosesi xarakteristikası

Figure 4 – Transition characteristics of a control system based on ordinary and Z numbers

- a) Distance error of a dynamic device with a fuzzy controller
- b) Distance error of a dynamic device with a smooth controller
- c) Transient process characteristics of a Z-based (full linear) and a conventional fuzzy (broken linear) controller

Şəkildə bütöv xətt Z ədədli qeyri-səlis tənzimləyici ilə idarəetmə sisteminin cavab xarakteristikasıdır; qırıq xətt adi qeyri-səlis idarəetmə sisteminin cavab xarakteristikasıdır. Şəkildən göründüyü kimi hər iki tənzimləyici üçün statik xətlərin qiymətləri sıfırdır; keçici ötürmələr eynidir (19%-ə yaxın). 100 iterasiya üçün idarəetmə sistemlərinin XOKK qiymətlərinin cəmi Cədvəl 2-də verilmişdir. Z ədədinə əsaslanan idarəetmə sisteminin XOKK qiyməti ənənəvi qeyri-səlis idarəetmə sistemindən azdır.

Növbəti simulyasiyada qeyri-səlis Z ədədinə əsaslanan idarəetmə sistemi düstur (14) ilə verilmiş müxtəlif təyinat nöqtəsi siqnallarından istifadə etməklə sınaqdan keçirilmişdir.

Cədvəl 2-də altı qeyri-səlis məntiqi operator üçün orta kvadratik xəta qiyməti hesablanmışdır. Alınmış nəticələrin analizi ALI2 qeyri-səlis məntiqinə görə qeyri-səlis tənzimləyici daha kiçik xəta ilə işləyir.

Cədvəl 2 – Qeyri-səlis implikasiya operatorlarına görə qeyri-səlis tənzimləyiciin OKXK qiymətləri
Table 2 – The values of the fuzzy controller's RMSE due to fuzzy implication operators

Qeyri-səlis implikasiya	Luka-se-vich	Mam-dani	KD	ALI1	ALI2	ALI3
Qeyri-səlis sistemin OKXQ	36.86	42.209	36.861	36.869	36.733	36.867

Səlis və qeyri-səlis idarəetmə sisteminin simulyasiyası üçün XOKK qiymətləri cədvəl 3-də verilmişdir. Göründüyü kimi, Z ədədinə əsaslanan qeyri-səlis idarəetmə sistemi üçün XOKK qiyməti ənənəvi qeyri-səlis tənzimləyicinin qiymətindən azdır. Cədvəl 3-

də qeyri-səlis idarəetmə sisteminin simulyasiya nəticələri adi qeyri-səlis tənzimləyicili idarəetmə sistemlərinin simulyasiya nəticələri ilə müqayisə edilir.

Cədvəl 3 – Səlis və qeyri-səlis idarəetmə sisteminin simulyasiyası üçün XOKK qiymətləri
Table 3 – RMSE values for fuzzy and fuzzy control system simulation

Tənzimləyici	Xətanın orta kvadratik qiyməti $k=100$ iterasiyalı
Qeyri-səlis	36.733
Z ədəd əsaslı tənzimləyici	18.651

Cədvəl 3-də idarəetmə sistemlərinin cavab xarakteristikasının XOKK qiymətlərinin müqayisəli qiymətləndirilməsinin nəticələri verilmişdir. Simulyasiya nəticələri dinamik qurğuların idarə edilməsində Z ədədinə əsaslanan tənzimləyicidən istifadənin səmərəliliyini nümayiş etdirir.

Nəticə

Məqalədə Z ədədinə əsaslanan qeyri-səlis nəticə çıxarma sisteminin dizaynı təqdim olunur. Qeyri-səlis sistemin interpolativ nəticə çıxarma mexanizmi təqdim edilmiş və eyni nəticə çıxarma mexanizmi Z ədədli qeyri-səlis sistem üçün hazırlanmışdır. Z qeyri-səlis qaydalar bazası işlənilib hazırlanmış və dəyişənlərin qeyri-səlis qiymətlərinin etibarlılıq dərəcələri qiymətləndirilir. Z ədədli sistemdən istifadə edərək interpolativ qeyri-səlis nəticə çıxarma mühərriki prosesi dizayn edilmişdir.

Hazırlanmış alqoritm dinamik qurğuların idarə edilməsi üçün istifadə olunur. Mütəxəssislərin biliklərindən istifadə edərək If-Then qaydalar bazası tərtib edilmişdir. Dəyişənlərin qeyri-səlis qiymətlərinin etibarlılıq dərəcələri qiymətləndirilir. Qaydalar bazası və qeyri-səlis interpolativ mülahizələrdən istifa-

də edərək dinamik qurğularda idarəetmə həyata keçirilir. Alınmış nəticələr dinamik qurğuların idarə edilməsində layihələndirilmiş sistemin uyğunluğunu nümayiş etdirir.

Maraqlar münaqişəsi

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

REFERENCES

1. **Zadeh L.A.** A note on Z-numbers, *Information Sciences*, vol. 181, no. 14, pp. 2923–2932, 2011.
2. **Aliev R.A., Huseynov O.H., Aliyev R.R., Alizadeh A.A.** The arithmetic of Z-numbers, World Scientific Publishing, 2015.
3. **Longzhi Yang, Zheming Zuo, Fei Chao, Yanpeng Qu.** Fuzzy Interpolation Systems and Applications. World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher
4. **Lorkowski J., Kreinovich V., Aliev R.A.** Towards decision making under interval, set-valued, fuzzy, and Z-number uncertainty: a fair price approach, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE '14)*, pp. 2244–2253, Beijing, China, July 2014.
5. **Koczy L.T., Hirota K.** Interpolyative reasoning with insufficient evidence in sparse fuzzy rule bases, *Information Sciences*, vol. 71, no. 1-2, pp. 169–201, 1993.
6. **Kovacs S.** Application of interpolation-based fuzzy logic reasoning in behaviour-based control structures,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, UZZIEEE*, vol. 6, pp. 25–29, Budapest, Hungary, July 2004.
7. **Huang Z., Shen Q.** A new fuzzy interpolyative reasoning method based on center of gravity, in *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ '03)*, IEEE, May 2003, vol. 1, pp. 25–30.
8. **Abiyev R.H.** Z Number Based Fuzzy Inference System for Dynamic Plant Control. Applied Artificial Intelligence Research Centre, Department of Computer Engineering, Near East University, Northern Cyprus, Mersin 10, Turkey. 2016.
9. **Abiyev R. H., Kaynak O.** Type 2 fuzzy neural structure for identification and control of time-varying plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4147–4159, 2010.
10. **Mammadova K.A., Aliyeva Y.N., Aliyeva A.A.** Calculating the collision risk of a mobile robot with a fuzzy controller in an environment with dynamic obstacles. *Reliability: Theory and Applications*, Special Issue № 6 (80), Part-2, Volume 19, December 2024.
11. **Məmmədova K.A.** Z ədədlərinin köməyi ilə qeyri-səlis mühitdə qida təhlükəsizliyi üçün risk səviyyəsinin təyin edilməsi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri/ Beynəlxalq elmi-texniki jurnal*. 2022, cild 14, № 1, s. 117-124.
12. **Mammadova K.A., Abasov I.A.** Natamam informasiya şəraitində qərar qəbuletmə məsələlərinin həlli zamanı Z ədədlərə əsaslanan qərar qəbuletmə modellərinin tədqiqi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 2024, cild 16 (4), s. 69-75.

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@gmail.com

The article can be written in any of three languages: Azerbaijani, English or Russian (max 10 pp.) and must include:

1. Title of the article, Name, Middle Name (if applicable), Surname of authors, names of organizations of each author and addresses of organizations;
2. E-mail of one of the authors;
3. Abstract (about 1000 characters);
4. Key words (up to 6 words).

All of the above information must be translated into three languages.

5. The text of the article with a breakdown into *Introduction, Purpose of work, Problem statement, Problem solution, Conclusion*.

6. Universal Decimal Classification code, also known as УДК.

7. The transliterated in the Latin alphabet the list of used References (min 7 – max 10) with full bibliographic data on the source, including a link to journal "Herald of the Azerbaijan Engineering Academy". The list is compiled in the order of the references in the text (1, 2, 3 ...), and not randomly.

8. Titles of figures and tables in the language of writing the article plus their translation into English. Figures and tables are located directly in the text of the article next to the mandatory links to them.

The submitted manuscripts undergo a plagiarism check procedure. The originality index must be at least 75%.

Articles are reviewed by doctors or candidates of sciences appointed by the editorial board. The following are involved in reviewing articles: members of the editorial board, editorial board and leading experts. The review period is up to 3 months. In case of comments on the article, the editors will contact the author. After repeated author's editing, the article is sent for re-review, and then, based on the final opinion of the reviewer, the editorial board approves the article for publication or rejects it. The editors reserve the right to make editorial changes.

In order to avoid typing errors in the layout of the article, please send the text and figures in electronic form using format .docx of Microsoft Word, and font Times New Roman 12, interval 1,15.

No fee is charged from the authors for the publication of the manuscript.

More detailed information and a sample article formatting can be found on the website: <https://journal.ama.com.az/>

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@gmail.com elektron ünvanına göndərilməlidir.

Məqalə azərbaycan, ingilis və ya rus dillərində 10 səhifədən çox olmamaq şərtlə yazıla bilər və aşağıdakıları özündə əks etdirməlidir:

1. Məqalənin adı, müəlliflərin A.A. Soyadı, hər bir müəllifin çalışdığı müəssisənin adı və ünvanı;
2. Müəlliflərdən birinin E-maili;
3. Xülasə, 1000 simvol;
4. Açar sözlər, 6 sözdən çox olmayaraq;

Bütün bu məlumatlar hər üç dildə təqdim olunmalıdır.

5. *Giriş, İşin məqsədi, Məsələnin qoyuluşu, Məsələnin həlli, Nəticə* - bölmələri ilə məqalənin mətni;

6. UOT kodu;

7. İstifadə olunmuş mənbələrin latın dilində transliterasiya edilmiş mətninin siyahısı (7-10 aralığında), mənbə haqqında tam məlumat. Həmçinin "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri" jurnalına istinad. Siyahı təsadüfi yolla deyil, məndəki istinadların sırasına əsasən (1, 2, 3...) tərtib olunur.

8. Şəkil və cədvəllərin məqalənin yazıldığı dildə adları, həmçinin, onların ingilis dilinə tərcüməsi. Şəkil və cədvəllər birbaşa məqalənin mətnində onlara istinadların yanında yerləşdirilməlidir.

Redaksiyaya daxil olmuş məqalələr plagiat yoxlama prosedurundan keçir. Orijinallıq indeksi azı 75% olmalıdır.

Məqalələrə redaksiya heyəti tərəfindən təyin olunmuş elmlər doktorları və ya namizədləri rəy verir. Məqalələrə rəy vermək üçün redaksiya heyəti və şurası üzvləri, eləcə də aparıcı mütəxəssislər cəlb edilir. Rəyin verilmə müddəti 3 aya qədərdir. Məqaləyə mənfi rəy verildiyi halda redaksiya bu barədə müəllifə məlumat verir. Müəlliflərin təkrar düzəlişlərindən sonra məqalə yenidən rəyçilərə göndərilir, sonra isə rəyçinin son rəyinə əsasən redaksiya heyəti məqaləni nəşr üçün təsdiqləyir və ya imtina edir. Redaksiya mətni redaktə etmək hüququna malikdir.

Mətnin yenidən yığılması zamanı yarana biləcək nöqsanları aradan qaldırmaq məqsədi ilə məqalə mətni Word for Windows formatında, Times New Roman 12 şrifti, 1,15 interval ilə elektron şəkildə də redaksiyaya təqdim edilməlidir.

Əlyazmanın nəşri üçün müəlliflərdən ödəniş alınmır.

Daha çox məlumat və məqalənin tərtibatı nümunəsi saytda: <https://journal.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@gmail.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 вышперечисленная информация должна быть переведена на три языка.

5. Текст статьи с разбивкой на *Введение, Цель работы, Постановка задачи, Решение задачи, Заключение*;

6. Код УДК;

7. Транслитерированный на латинице список использованной литературы (в пределах 7–10) с указанием полных библиографических данных об источнике. В том числе ссылка на журнал «Вестник Азербайджанской Инженерной Академии». Список составляется в порядке указания ссылок в тексте по возрастающей: 1, 2, 3..., а не вразброс.

8. Названия рисунков и таблиц на языке написания статьи плюс их перевод на английский язык. Рисунки и таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи рядом со ссылками на них.

Поступившие в редакцию рукописи проходят процедуру проверки на плагиат. Индекс оригинальности должен составлять не менее 75%.

Статьи рецензируются докторами и кандидатами наук, назначаемыми редакционной коллегией. К рецензированию статей привлекаются: члены редколлегии, редсовет и ведущие специалисты. Срок рецензирования составляет до 3 месяцев. В случае замечаний к статье редакция свяжется с автором. После повторного авторского редактирования статья направляется для повторной рецензии, а затем на основании окончательного заключения рецензента редколлегия утверждает статью для публикации либо отклоняет. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения.

С целью исключения опечатки при верстке статьи просьба прислать текст и рисунки в электронном виде в формате Word for Windows, шрифт Times New Roman 12, интервал 1,15.

Плата с авторов за публикацию рукописи не взимается.

Более подробная информация и образец оформления статьи: <https://journal.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 17. № 3
Vol. 17. № 3
Том 17. № 3

BAKİ – 2025

“Nəşriyyat və yayım şöbəsi”nin müdiri
Akif Dənziyev

“İctimaiyyətlə əlaqələr şöbəsi”nin müdiri
Pərvin Süleymanova

“Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
XƏBƏRLƏRİ”

jurnalı redaksiyanın kompüterlərində yığılmış və
hazır diapozitivlərdən **“Apostrof-A”**
mətbəəsində ofset üsulu ilə çap olunmuşdur.

Çapa imzalanıb 25.9.2025
formatı 60x84 1/8,
kağız ofset, f.ç.v. 16.5
Tirajı 1100 əd.