ISSN 2181-7383

O‘zbekiston

KONCHILIK XABARNOMASI

3

№ 106

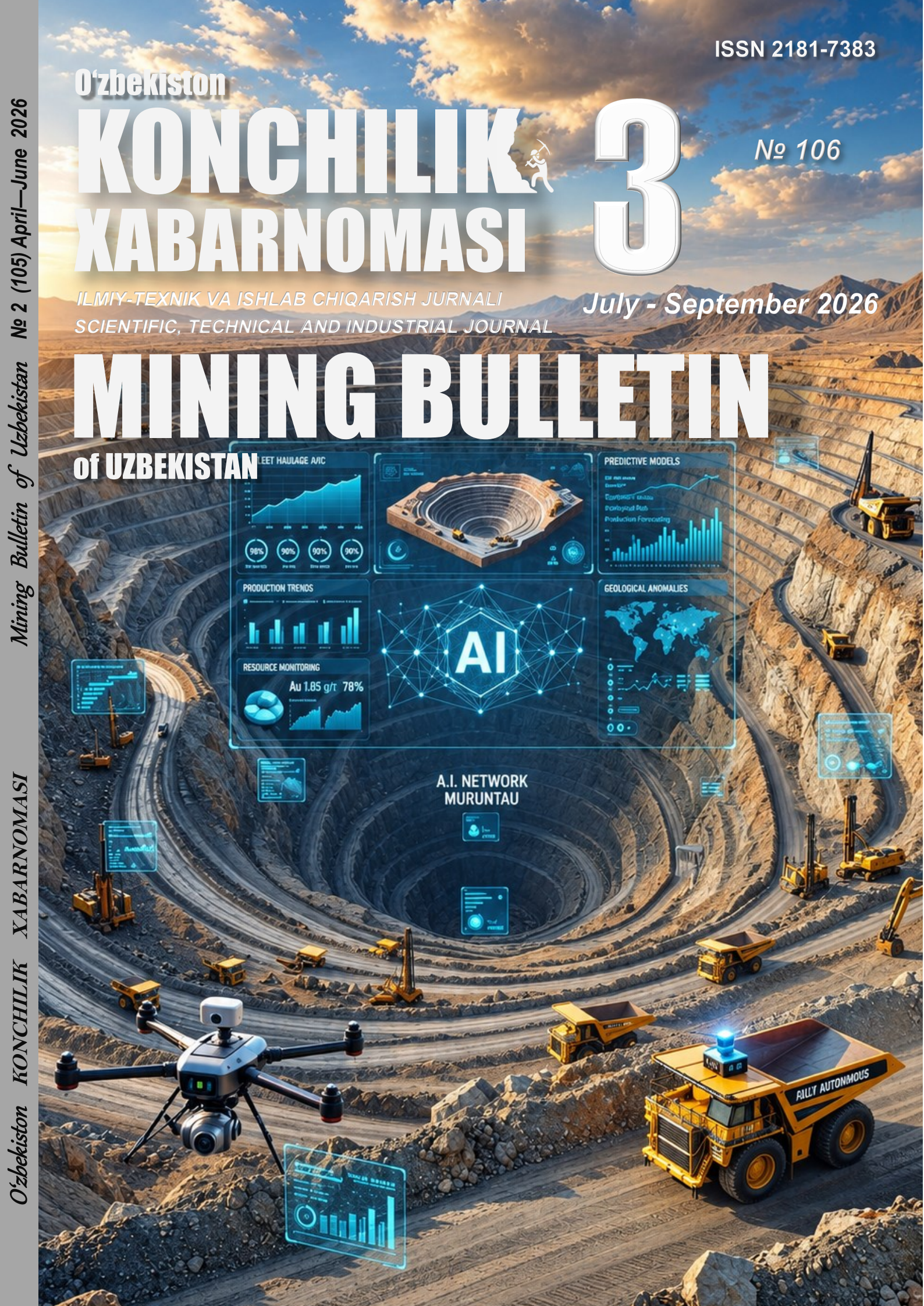
ILMIY-TEXNIK VA ISHLAB CHIQARISH JURNALI

SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

July - September 2026

MINING BULLETIN

of UZBEKISTAN



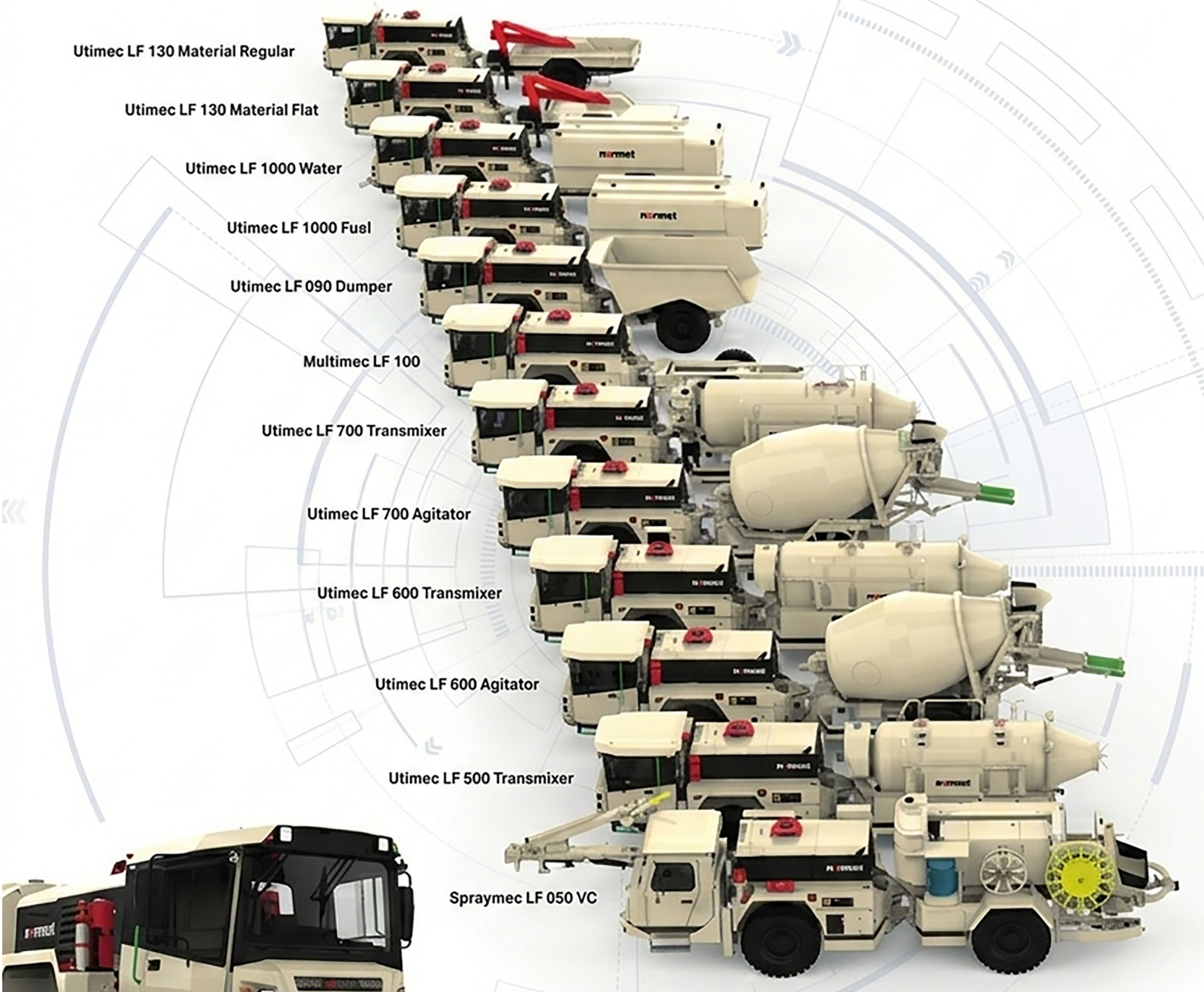
O‘zbekiston KONCHILIK XABARNOMASI № 2 (105) April—June 2026
Mining Bulletin of Uzbekistan

ИННОВАЦИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

normet
NORMET.COM

Серия –L в производственной линейке Normet обладает высокой производительностью и надежностью для самых тяжелых условий работ в шахтах и тоннелях.

- **Минимальный выброс выхлопных газов – чистый воздух в выработках**
- **Новая усовершенствованная кабина с лучшим обзором и эргономичностью**
- **Увеличенная мощность ДВС и других узлов для высокой производительности**



СООБЩИТЕ НАМ СВОИ ПОТРЕБНОСТИ!

Normet International Ltd.
Предстаеительстео в Республике Уабекистан, г.Ташкент, 100084, ул. А.Темура 95А.
Тел.: +998 93 390 0799
Факс: +998 78 140 92 92



Ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali, 1997 yil iyul oyidan chiqa boshlagan. Bir yilda to‘rt marta nashr etiladi.

Ta’sischilar:
«Navoiy kon-metallurgiya kombinati» AJ, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O‘zbekiston geotexnologiya va rangli metallurgiya ilmiy-tadqiqot va qidiruv-loyihalashtirish instituti «O‘zGEORANGMETLITI» MChJ

Moliyaviy qo‘llab quvvatlovchi:
«Navoiy KMK» AJ

Bosh muharrir:
Sh.Sh. Aliqulov

Bosh muharrir o‘rinbosari:
U.Z. Sharafutdinov

Texnik va badiiy muharrir:
R.A.Xamidov, M.O.Saidov

Bo‘limlar bo‘yicha tahrir hay’ati tarkibi: Mardonov B.T. (O‘zbekiston), Duysebayev B.O. (Qozog‘iston), Gapeyev S.N. (Ukraina), Sanaqulov Q. (O‘zbekiston), Mahmudov A.M. (O‘zbekiston), Misliboyev I.T. (O‘zbekiston), Nosirov U.F. (O‘zbekiston), Raimjanov B.R. (O‘zbekiston); Snitka N.P. (O‘zbekiston), Halimov I.U. (O‘zbekiston), Drebenstedt K. (Germaniya), Hamroyev I.O. (O‘zbekiston), Mirhadjayev B. (O‘zbekiston), Dementyev V.E. (Rossiya), Abdurahmonov S.A. (O‘zbekiston), Samadov A.U. (O‘zbekiston), Xasanov A.S. (O‘zbekiston), Ergashev U.A. (O‘zbekiston), Yakubov M.M. (O‘zbekiston), Volkova O.N. (Germaniya), Mishina O.V. (Germaniya), Mustakimov O.M. (O‘zbekiston), Xamidov R.A. (O‘zbekiston), Voxidov B.R. (O‘zbekiston), Doniyarov N.A. (O‘zbekiston), Muxiddinov B.F. (O‘zbekiston), Nurmurodov T.I. (O‘zbekiston), Reymov A.M. (O‘zbekiston), Sagdiyeva M.G. (O‘zbekiston), Hamidov X.I. (O‘zbekiston), Sharipov S.Sh. (O‘zbekiston), Abduazizov N.A. (O‘zbekiston), Kovalyov I.V. (Rossiya), Ataqulov L.N. (O‘zbekiston), Egamberdiyev I.P. (O‘zbekiston), Tabakman I.B. (Kanada), Qarshibayev A.I. (O‘zbekiston), Narzullayev B.Sh. (O‘zbekiston), Vorobyov A.G. (Rossiya), Kadirov Y.B. (O‘zbekiston), Botirov T.V. (O‘zbekiston), Gulyamov B.V. (O‘zbekiston), Yusupov U.B. (O‘zbekiston), Muminov R.O. (O‘zbekiston), Raziqov Z.A. (Tojikiston), Raxmatov A.B. (O‘zbekiston), Vorobyov A.E. (Rossiya), Kvint V.L. (Rossiya), Djulibekov N.K. (O‘zbekiston), Ashurova N.B. (O‘zbekiston), Xaitova O.S. (O‘zbekiston)

Jurnal O‘zbekiston Matbuot va axborot agentligida 2006 yil 13 dekabrda ro‘yxatga olingan. Qayd etish guvohnomasi № 0033. ISSN 2181-7383, 2013 yil 9 iyul kuni qayta ro‘yxatga olingan bo‘lib qayd etish guvohnomasi № 01-22/37 S

Jurnaldan ko‘chirib bosilganda manba qayd etilishi shart

Jurnalda chop etilgan ma’lumot va keltirilgan dalillarning aniqligi uchun muallif javobgardir

Tahririyat manzili:
210100, Navoiy viloyati, Navoiy, G'alaba ko'chasi, 76V
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

Tel.: +99879 223-47-16

E-mail: konchilik_xabarnomasi@nsumt.uz

Web-sayt: http://www.gorniyvestnik.uz

Muqova, dizayn, terish bo‘yicha mas’ul:
R.A.Xamidov, M.O.Saidov

Jurnalning chop etilishi va elektron shaklini yangilab boruvchi mas’ul:
Aliqulov Sh.Sh.

Chop qilindi:
NDKTU
210100, Navoiy viloyati, Navoiy, G'alaba ko'chasi, 76V
Tel.: +998 (79) 223-23-32, +998 (79) 223-49-66

Nashr etishga 25.03.2026 y. imzolandi
A3 formatda. Adadi 100 nusxa
© O‘zbekiston konchilik xabarnomasi 2026

Scientific, Technical and Industrial Journal, published since July 1997. Issued four times a year.

Founders:
Joint-Stock Company “Navoi Mining and Metallurgical Combine” (NMMC),Navoi State University of Mining and Technologies, Research and Design Institute of Geotechnology and Non-Ferrous Metallurgy “UzGEORANGMETLITI” LLC.

Financial Support:
JSC “Navoi Mining and Metallurgical Combine” (NMMC)

Editor-in-Chief:
Sh.Sh. Alikulov

Deputy Editor-in-Chief:
U.Z. Sharafutdinov

Technical and Artistic Editors:
R.A.Khamidov, M.O.Saidov

Editorial Board by Sections: Mardonov B.T. (Uzbekistan), Duysebaev B.O. (Kazakhstan), Gapeev S.N. (Ukraine), Sanakulov K. (Uzbekistan), Mahmudov A.M. (Uzbekistan), Misliboev I.T. (Uzbekistan), Nosirov U.F. (Uzbekistan), Raimjanov B.R. (Uzbekistan), Snitka N.P. (Uzbekistan), Halimov I.U. (Uzbekistan), Drebenstedt K. (Germaniya), Hamroev I.O. (Uzbekistan), Mirhadjaev B. (Uzbekistan); Dementyev V.E. (Russia), Abdurahmonov S.A. (Uzbekistan), Samadov A.U. (Uzbekistan), Khasanov A.S. (Uzbekistan), Ergashev U.A. (Uzbekistan), Yakubov M.M. (Uzbekistan), Volkova O.N. (Germany), Mishina O.V. (Germany), Mustakimov O.M. (Uzbekistan), Khamidov R.A. (Uzbekistan), Vokhidov B.R (Uzbekistan), Doniyarov N.A. (Uzbekistan), Muxiddinov B.F. (Uzbekistan), Nurmurodov T.I. (Uzbekistan), Reymov A.M. (Uzbekistan), Sagdiyeva M.G. (Uzbekistan), Hamidov X.I. (Uzbekistan), Sharipov S.Sh. (Uzbekistan); Abduazizov N.A. (Uzbekistan), Kovalyov I.V. (Russia), Ataqulov L.N. (Uzbekistan), Egamberdiev I.P. (Uzbekistan), Tabakman I.B. (Canada), Qarshibayev A.I. (Uzbekistan), Narzullayev B.Sh. (Uzbekistan), Vorobyov A.G. (Russia), Kadirov Y.B. (Uzbekistan), Botirov T.V. (Uzbekistan), Gulyamov B.V. (Uzbekistan), Yusupov U.B. (Uzbekistan), Muminov R.O. (Uzbekistan), Raziqov Z.A. (Tajikistan), Rakhmatov A.B. (Uzbekistan); Vorobyov A.E. (Russia), Kvint V.L. (Russia), Djulibekov N.K. (Uzbekistan), Ashurova N.B. (Uzbekistan), Khaitova O.S. (Uzbekistan).

The journal is registered with the Uzbek Agency for Press and Information. Registration certificate No. 0033 dated 13 December 2006. ISSN 2181-7383, registration No. 01-22/37 S dated 9 July 2013.

When reprinting materials, a reference to the journal is mandatory.

The authors are responsible for the accuracy of the facts and the reliability of the information.

Editorial address:
210100, Galaba avenue 76v, Navoi city, Navoi region, Uzbekistan
Navoi State University of Mining and Technologies

Тел.: +99879 223-47-16

E-mail: konchilik_xabarnomasi@nsumt.uz

Website: http://www.gorniyvestnik.uz

Cover, design, computer layout:
R.A.Khamidov, M.O.Saidov

Responsible for publishing and updating the electronic form of the journal:
Aliqulov Sh.Sh.

Printed:
NSUMT
210100, Galaba avenue 76v, Navoi city,
Navoi region, Uzbekistan
Tel.: +998 (79) 223-23-32, +998 (79) 223-49-66

Approved for printing on 25 December 2025.
Format: A3. Print run: 100 copies.
© Mountain Herald of Uzbekistan 2025

ISSN 2181-7383
4 780010 201746 >

MUNDARIJA / ОГЛАВЛЕНИЕ

FOYDALI QAZILMALARNI BOYITISH / ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Шакаров Т.И., Эралиев Д.К., Масидиков Ш.А. Обоснование температурного режима селективной флотации молибдена из коллективного медно-молибденового концентрата 4

A.A. Xasanov, X.B. Xojimuratova. Sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish istiqbollari 13

GEOTEXNOLOGIYA / ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Файзуллаев Дж.С., Сапаров А.Б., Рузиев О.Б., Бозоров Ф.А., Рузиев Б.Т. Теоретические предпосылки и перспективы применения микропузырьковой аэрации при подземном выщелачивании урана 20

Файзуллаев Дж.С., Курбонов К.Б., Рузиев Б.Т., Тимербулатов А.Р., Утаев С.М. Повышение фильтрационных свойств технологических растворов участка ПВ «Мойбулок» при подземном выщелачивании урана 28

TOG‘-KON SANOAT GEOLOGIYASI VA GEOFIZIKASI / ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

B.A. Elibaev, B.I. Mirkhodjaev. G‘arbiy O‘zbekiston uranli maydonlarining istiqbolliligi bo‘yicha geokimyoviy indikatorlar 36

GEOMEXANIKA, MARKSHEYDERLIK ISHI VA GEODEZIYA / ГЕОМЕХАНИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОДЕЗИЯ

Гапеев С.Н., Хакимов Ш.И., Тимченко А.Н. Моделирование перехода лавой технологических наклонных сбоек с надрабатываемыми штреками при отработке угольных пластов 44

K.D. Salyamova, G‘.X. Bakirov, F.Yu. Zairova, X.A. Nurxonov. Qazib olish ishlari ta’sirida kon lahimi mustahkamlagichlariga tushadigan yuklamalarni chekli elementlar usuli asosida baholash..... 62

KON MASHINALARI VA USKUNALARI / ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

A. Maxmudov, S.T. Axmedov. Kon atmosferasi dizel dvigatelining ishchi tanasi: havo uzatish trakti orqali havo sarfi va tozalash vositalariga tushadigan chang yuklamasi..... 70

Кахаров С.К., Ишназаров О.Х. Предиктивное управление частотно-регулируемым электроприводом грунтового насоса с учётом гидроабразивного износа 79

KIMYOVIY TEXNOLOGIYA / ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Jo‘raev , R.K. Shokirov.. Izosiyanat guruhli uretan oligomerlarining konsentrasiylarini polikondensatsiyalanish mexanizmiga ta’sirni o‘rganish 86

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Jo‘raev, D.T. Isayev. Stabilizator konsentratsiyasining qayta ishlangan poliuretan materialining termik barqarorligiga ta'siri 94

SANOAT XAVFSIZLIGI VA EKOLOGIYA / ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ

F. Muxtar, O.A. Jumayev, M.T. Ismoilov, A.K. Raximov. Yarimo‘tkazgichli nanomateriallar yordamida fotokatalitik parchalanishga oid global tadqiqottendensiyalari: bibliografik tahlil.... 103

MATERIALSHUNOSLIK / МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

B.T. Mardonov, M.X. Sayfidinova. Yuqori xromli po'lat shlagining fazaviy va element tarkibi tahlili va sanoatda qayta ishlash yo'llari 112

ELEKTR ENERGETIKASI VA ELEKTROTEXNIKA / ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

A.N. Tovboyev, I.B. Tog‘ayev. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini monitoring qilishning nazariy asoslari 117

A.I. Qarshibayev, F.N. Raxmonov. Yuqori kuchlanishli havo liniyalarining samaradorligini oshirishda muzlash jarayonlarini oldini olish usularini ishlab chiqish 127

AXBOROT TEXNOLOGIYALARI VA SUN’IY INTELLEKT / ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

O.A. Tuychiyev, O.V. Tuyboyov. Yuqori o‘lchamli nochiziqli sanoat tizimlari uchun sun’iy intellektga asoslangan boshqaruv modellari 133

TEXNOLOGIK JARAYONLARNI AVTOMATLASHTIRISH VA BOSHQARISH / АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Кадиров Ё.Б., Чулиева Г.Х. Определение и поддержание параметров гидропонной установки..... 143

CONTENTS

MINERAL PROCESSING

T.I. Shakarov, D.K. Eraliev, Sh.A. Masidikov. Justification of the temperature regime for selective molybdenum flotation from a bulk copper-molybdenum concentrate…..…….. 4

A.A. Khasanov, X.B. Xojimuratova. Prospects for the use of environmentally friendly reagents in sulfide ore beneficiation ……. 13

GEOTECHNOLOGY

J.S. Fayzullayev, A.B. Saparov, O.B. Ruziyev, F.A. Bozorov, B.T. Ruziyev. Theoretical background and prospects for the application of micro-bubble aeration in the in-situ leaching of uranium …… 20

J.S. Fayzullaev, K.B. Kurbonov, B.T. Ruziev, A.R. Timerbulatov, S.M. Utaev. Improving the filtration properties of technological solutions at the "Moybulok" ISL site during in-situ leaching of uranium …… 28

MINING GEOLOGY AND GEOPHYSICS

B.A. Elibaev, B.I. Mirkhodjaev. Geochemical indicators of the prospects of uranium-bearing areas in Western Uzbekistan …….. 36

GEOMECHANICS, MINE SURVEYING AND GEODESY

Sh.I. Khakimov, S.N. Hapieiev, A.N. Tymchenko. Numerical modeling of longwall crossing of inclined technological crosscuts with overmined gateroads in coal seam mining …….. 44

K.D. Salyamova, G.Kh. Bakirov, F.Yu. Zairova, Kh.A. Nurkhonov. Assessment of loads on mine working supports under the influence of mining operations using the finite element method …….. 62

MINING MACHINERY AND AQUIPMENT

A. Makhmudov, S.T.Akhmedov. The mine atmosphere as a working fluid in a diesel engine: air flow through the air intake system and dust load on filters …… 70

S.K. Kakharov, O.Kh. Ishnazarov. Predictive control of the variable-frequency drive of the 8GR8 slurry pump under hydroabrasive wear (copper concentrator of JSC «ALMALYK MMC»)… 79

CHEMICAL TECHNOLOGY

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Juraev, R.K. Shokirov. Investigation of the influence of isocyanate-containing urethane oligomer concentrations on the polycondensation mechanism….. 86

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Juraev, D.T. Isaev. Effect of stabilizer concentration on the thermal stability of recycled polyurethane material ……..….. 94

INDUSTRIAL SAFETY AND ENVIRONMENT

F. Mukhtar, O.A. Jumaev, M.T. Ismoilov, A.K. Rakhimov. Global research trends in photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials: a bibliographic analysis ……... 103

MATERIALS SCIENCE

B.T. Mardonov, M.Kh. Sayfidinova. Global Phase and elemental characterization of high-chromium steel slag for industrial utilization ……... 112

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

A.N. Tovboev, I.B. Togaev. Theoretical foundations for monitoring corona discharge processes on high-voltage overhead transmission lines …….. 117

A.I. Karshibaev, F.N. Rakhmonov. Development of anti-icing methods to enhance the efficiency of high-voltage overhead power transmission lines ……..… 127

INFORMATION TECHNOLOGY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

O.A. Tuychiyev, O.V. Tuyboyov. Artificial intelligence–based control models for high-dimensional nonlinear industrial systems…….. 133

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Yo.B. Kadirov, G.H. Chulieva. Intelligent Determination and maintenance of hydroponic system parameters …….. 143

УДК 622.765.063.2 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.1

ОБОСНОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СЕЛЕКТИВНОЙ ФЛОТАЦИИ МОЛИБДЕНА ИЗ КОЛЛЕКТИВНОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Шакаров Т.И., Эралиев Д.К., Масидиков Ш.А.

Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Республика Узбекистан

Аннотация. *Статья посвящена научно-технологическому обоснованию температуры пульпы после тепловой подготовки коллективного медно-молибденового концентрата при селективной флотации молибдена в условиях МОФ АО «Алмалыкский ГМК». После уточнения аналитических данных выполнена проверка двухпродуктового материального баланса основной флотации по Mo, Cu, Au и Ag; расхождения между расчетными выходами по отдельным компонентам не превышают 0,08 процентного пункта и находятся в пределах округления исходных анализов. При снижении температуры от 75 до 40 °C содержание Mo в черновом молибденовом концентрате возрастает с 1,42 до 2,06 %, содержание Mo в хвостах уменьшается с 0,072 до 0,042 %, расчетный выход концентрата снижается с 15,43 до 11,79 %, а извлечение Mo возрастает с 78,25 до 86,77 %. Извлечение Cu в черновой концентрат изменяется немонотонно и составляет соответственно 6,48; 14,10; 4,63 и 5,82 %, что указывает на необходимость оценки температурного режима не только по основной операции, но и по результатам последующих перечисток. В концентрате 3-й перечистки при снижении температуры от 75 до 40 °C содержание Mo повышается с 18,56 до 21,62 %, содержание Cu уменьшается с 10,30 до 7,56 %, а условный индекс Mo/Cu возрастает с 1,80 до 2,86. Установлено, что среди исследованных режимов температура 40 °C обеспечивает наилучшее совокупное сочетание извлечения Mo в основной флотации и качества конечного перечистного продукта, тогда как минимальный перенос Cu в черновой концентрат наблюдается при 50 °C. Полученные результаты подтверждают целесообразность рассматривать температуру после пропарки как самостоятельный управляемый параметр селекции. Режим около 40 °C рекомендуется как исходный для опытно-промышленной проверки с обязательным контролем пооперационных выходов, извлечений, pH, ОВП, расхода реагентов и теплового баланса.*

Ключевые слова: *селективная флотация; молибденит; халькопирит; медно-молибденовый концентрат; температура пульпы; пропарка; материальный баланс; извлечение молибдена; перечистные операции; депрессия медных сульфидов; индекс селективности.*

KOLLEKTIV MIS-MOLIBDEN KONSENTRATIDAN MOLIBDENNI SELEKTIV FLOTATSIYA USULIDA AJRATIB OLISHDA HARORAT REJIMINI ASOSLASH

T.I. Shakarov, D.K. Eraliev, Sh.A. Masidikov

Milliy tadqiqotlar texnologiya universiteti «MISIS»ning Olmaliq filiali, O‘zbekiston Respublikasi

Annotasiya. *Maqolada «Olmaliq KMK» AJ boyitish fabrikasi sharoitida kollektiv mis-molibden konsentratiga termik ishlov berilgandan keyingi bo‘tana haroratining molibdenni selektiv flotatsiya qilish samaradorligiga ta’siri ilmiy-texnologik jihatdan asoslangan. Aniqlashtirilgan tahliliy ma’lumotlar asosiy flotatsiya uchun Mo, Cu, Au va Ag bo‘yicha ikki mahsulotli moddiy balans yordamida tekshirildi; alohida komponentlar bo‘yicha hisoblangan mahsulot chiqishlari orasidagi farq 0,08 foiz punktidan oshmadi va tahlil natijalarini yaxlitlash chegarasida qoldi. Harorat 75 dan 40 °C gacha pasayganda xomaki molibden konsentratidagi Mo miqdori 1,42 dan 2,06 % gacha oshdi, chiqindidagi Mo 0,072 dan 0,042 % gacha kamaydi, konsentratning hisobiy chiqishi 15,43 dan 11,79 % gacha pasaydi, Mo ajralishi esa 78,25 dan 86,77 % gacha oshdi. Cu ning xomaki konsentratga ajralishi nomonoton o‘zgarib, 6,48; 14,10; 4,63 va 5,82 % ni tashkil etdi. Shu sababli harorat ta’siri asosiy flotatsiya bilan bir qatorda keyingi qayta tozalash bosqichlari bo‘yicha ham baholandi. 3-qayta tozalash konsentratida harorat 75 dan 40 °C gacha pasayganda Mo 18,56 dan 21,62 % gacha oshdi, Cu 10,30 dan 7,56 % gacha kamaydi, shartli Mo/Cu indeksi esa 1,80 dan 2,86 gacha ko‘tarildi. Tadqiq qilingan rejimlar ichida 40 °C asosiy flotatsiyada Mo ajralishi va yakuniy tozalash mahsuloti sifati bo‘yicha eng qulay umumiy natijani berdi, xomaki konsentratga Cu ning eng kam o‘tishi esa 50 °C da kuzatildi. Natijalar bug‘ bilan termik ishlov berishdan keyingi haroratni seleksiya jarayonining mustaqil boshqariladigan parametri sifatida ko‘rib chiqish maqsadga muvofiqligini ko‘rsatadi. Taxminan 40 °C rejimi tajriba-sanoat sinovlari uchun boshlang‘ich variant sifatida tavsiya etiladi.*

Kalit so‘zlar: *selektiv flotatsiya; molibdenit; xalkopirit; mis-molibden konsentrati; bo‘tana harorati; termik tayyorlash; moddiy balans; molibden ajralishi; qayta tozalash; mis sulfidlari depressiyasi; selektivlik indeksi.*

JUSTIFICATION OF THE TEMPERATURE REGIME FOR SELECTIVE MOLYBDENUM FLOTATION FROM A BULK COPPER-MOLYBDENUM CONCENTRATE

T.I. Shakarov, D.K. Eraliev, Sh.A. Masidikov

Almalyk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS", Republic of Uzbekistan

Abstract. *This study provides a scientific and technological assessment of pulp temperature after thermal conditioning of a bulk copper-molybdenum concentrate during selective molybdenum flotation at JSC Almalyk MMC. The revised analytical data for rougher flotation were verified by a two-product material balance for Mo, Cu, Au and Ag; the product-yield estimates calculated from individual components differ by no more than 0.08 percentage points, which is within the rounding of the assays. Decreasing the pulp temperature from 75 to 40 °C increased Mo grade in the rougher molybdenum concentrate from 1.42 to 2.06 %, decreased Mo in rougher tailings from 0.072 to 0.042 %, reduced the calculated concentrate yield from 15.43 to 11.79 %, and increased Mo recovery from 78.25 to 86.77 %. Cu recovery to the rougher concentrate changed non-monotonically and amounted to 6.48, 14.10, 4.63 and 5.82 % at 75, 65, 50 and 40 °C, respectively; therefore, the temperature effect was evaluated not only at the rougher stage but also after cleaning. In the third-cleaner concentrate, decreasing temperature from 75 to 40 °C increased Mo grade from 18.56 to 21.62 %, decreased Cu grade from 10.30 to 7.56 %, and increased the conditional Mo/Cu ratio from 1.80 to 2.86. Among the tested conditions, 40 °C provided the most favorable overall combination of rougher Mo recovery and final cleaner-concentrate quality, whereas the minimum Cu transfer to the rougher concentrate occurred at 50 °C. The results support considering post-steaming pulp temperature as an independent controllable parameter of Cu-Mo separation. A temperature near 40 °C is proposed as a starting point for pilot-scale validation with complete stage-by-stage mass balances, recoveries, pH, redox potential, reagent consumption and heat-balance measurements.*

Keywords: *selective flotation; molybdenite; chalcopyrite; copper-molybdenum concentrate; pulp temperature; thermal conditioning; material balance; molybdenum recovery; cleaning stages; copper sulfide depression; selectivity index.*

Введение

Селективная флотация молибденита из коллективных медно-молибденовых концентратов относится к наиболее сложным операциям обогащения сульфидного сырья. После коллективной флотации молибденит, халькопирит и другие медные сульфиды обладают близкими флотационными свойствами вследствие остаточной адсорбции собирателей и аполярных реагентов, изменения окислительно-восстановительного состояния пульпы и формирования поверхностных реакционных слоев. Поэтому последующее разделение требует одновременного сохранения природной гидрофобности молибденита и целенаправленного снижения флотируемости медных сульфидов с использованием депрессоров и регулирующих воздействий [1–5, 8–11, 18].

Актуальность задачи определяется промышленной значимостью молибдена как легирующего и технологически ценного металла, извлекаемого попутно из медно-порфировых руд. Для крупнотоннажных фабрик даже умеренное повышение извлечения Mo или снижение содержания Cu в молибденовом продукте способно уменьшить нагрузку на перечистные и доводочные операции и сократить потери молибдена с медным продуктом. Поэтому управление условиями селекции должно оцениваться не только по содержанию металла в отдельном продукте, но и по материальному балансу, извлечению и устойчивости результата по всей цепочке операций [2, 6–8].

Молибденит имеет выраженно анизотропную слоистую структуру. Базальные плоскости MoS_2 характеризуются высокой природной гидрофобностью, тогда как кромочные и дефектные участки более реакционноспособны, легче гидратируются и окисляются и сильнее взаимодействуют с ионными компонентами жидкой фазы. Поэтому флотационные свойства молибденита зависят от гранулометрического состава, pH, состава оборотной воды, присутствия кальциевых и магниевых форм, окислительно-восстановительного потенциала и температуры пульпы. Рост доли тонких частиц повышает вклад активных кромочных поверхностей и делает процесс особенно чувствительным к изменениям химического режима [9, 12–16].

В промышленных схемах селекции Cu–Mo-концентратов применяется тепловая обработка (пропарка), предназначенная прежде всего для ослабления и десорбции остаточных коллекторных и аполярных покрытий с поверхности медных сульфидов и повышения эффективности их последующей депрессии. На МОФ АО «Алмалыкский ГМК» тепловая подготовка проводится при температуре порядка 80–85 °C. Однако функция пропарки и функция последующей селективной флотации не тождественны: температура, благоприятная для десорбционной подготовки, необязательно является оптимальной для закрепления частиц молибденита на пузырьках и для устойчивого разделения Mo- и Cu-содержащих минералов [2, 5, 9–11, 17].

Научная идея работы состоит в разделении двух технологических функций температурного воздействия: высокотемпературной подготовки поверхности при пропарке и собственно селективного флотационного разделения после регулируемого охлаждения. Цель исследования — установить, как температура пульпы после тепловой подготовки влияет на материальный баланс основной молибденовой флотации, извлечение Mo и Cu, а также на качество конечного продукта после трех перечисток, и на этой основе обосновать рациональный температурный диапазон для последующей опытно-промышленной проверки.

Материалы и методика исследования

Современные подходы к селекции Cu–Mo-концентратов основаны на создании устойчивого контраста поверхностных свойств молибденита и медных сульфидов. Молибденит должен сохранять достаточную гидрофобность и переходить в пенный продукт, тогда как халькопирит и сопутствующие медные минералы должны быть депрессированы. Эффективность разделения зависит от степени удаления остаточных коллекторных покрытий, состояния активных центров медных сульфидов, действия депрессоров и сохранности гидрофобных базальных поверхностей MoS_2 [3–5, 9–11, 18].

Предварительная тепловая обработка коллективного концентрата имеет технологическое обоснование: повышение температуры ускоряет десорбционно-кинетические процессы и может ослаблять часть органических поверхностных пленок, сформированных

в коллективном цикле. Вместе с тем температурное воздействие на минералы неодинаково. Для медных сульфидов тепловая подготовка может облегчать последующее действие депрессора, тогда как для молибденита длительное пребывание в нагретой щелочной пульпе потенциально усиливает превращения на реакционноспособных кромочных и дефектных участках. Поэтому высокую температуру пропарки нельзя автоматически переносить на все последующие флотационные перечистные операции [5, 9, 13, 17].

После завершения пропарки температура становится самостоятельным технологическим фактором. Ее изменение способно влиять на скорость поверхностного окисления, состав растворенных и гидроксокомплексных форм, устойчивость реагентных пленок, пенообразование и кинетику взаимодействия «частица–пузырек». Следовательно, контролируемое охлаждение пульпы должно оцениваться по совокупности показателей: выходу концентрата, извлечению Mo и Cu, содержанию компонентов в продуктах и качеству продукта после перечисток [14–16].

Для медно-молибденовых руд Алмалыкского региона эта задача особенно актуальна из-за сложного минералогического состава коллективного концентрата, присутствия пирита, силикатных и алюмосиликатных минералов, тонких сростков и шламовых частиц. Такие компоненты способны влиять на механический захват, расход реагентов и состав жидкой фазы. Поэтому температурный эффект целесообразно оценивать не по одному локальному показателю, а по согласованности баланса основной операции и по направленности изменения качества продукта в последующих перечистках [2, 6–8].

Для основной селективной флотации использован двухпродуктовый материальный баланс. При обозначениях α — содержание компонента в исходном питании, β — его содержание в концентрате, θ — содержание в хвостах, выход концентрата γ рассчитывали по выражению $\gamma = (\alpha - \theta)/(\beta - \theta) \cdot 100$ %, а извлечение компонента в концентрат — по выражению $\varepsilon = \gamma \cdot \beta/\alpha$. Расчет выполнялся прежде всего по Mo, после чего баланс проверялся по Cu, Au и Ag. Для перечистных операций, по которым отсутствуют массовые выходы промежуточных продуктов, количественные извлечения не рассчитывались; их эффективность оценивалась по содержаниям Mo и Cu и условному отношению Mo/Cu.

Объектом исследования являлся коллективный медно-молибденовый концентрат медных обогатительных фабрик АО «Алмалыкский ГМК». Исходный продукт уже прошел коллективную флотацию, вследствие чего на поверхности минералов присутствовали остаточные реагентные покрытия. В серии опытов изменяли только температуру пульпы после тепловой подготовки, тогда как остальные условия эксперимента поддерживали сопоставимыми для всех температурных вариантов.

Лабораторные испытания выполнялись по схеме, включающей пропарку коллективного концентрата при 80–85 °C, последующее охлаждение пульпы до заданной температуры, основную молибденовую флотацию и три перечистные операции (рис. 1). Для селективной флотации исследовали температуры 75, 65, 50 и 40 °C. Такой ряд позволяет проследить изменение технологических показателей при последовательном снижении температуры от режима, близкого к тепловой подготовке, до режима контролируемого охлаждения.

Масса навески исходного материала для каждого лабораторного опыта составляла около 1,0 кг по сухому веществу. В качестве исходной пробы использовали текущий коллективный медно-молибденовый концентрат медной обогатительной фабрики. Лабораторные исследования проводили на механических флотомашинах ФМЛ-0,3 и ФМЛ-1. Гранулометрическая характеристика исходного материала соответствовала крупности 80 % класса −0,071 мм. Расход флотационных реагентов, последовательность их подачи и продолжительность кондиционирования пульпы принимали в соответствии с действующим реагентным режимом промышленной обогатительной фабрики, что обеспечивало максимальное приближение лабораторных условий к производственным. Необходимую температуру пульпы перед проведением селективной флотации регулировали путем изменения температуры воды, используемой при приготовлении и разбавлении пульпы. Для каждого экспериментального режима температуру доводили до заданного значения непосредственно перед началом селективной флотации и контролировали в ходе проведения опыта.

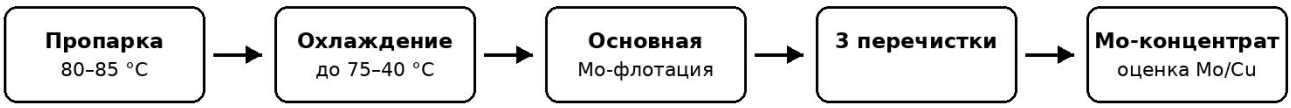


Рисунок 1. Схема лабораторных испытаний влияния температуры на показатели селективной флотации коллективного Cu–Mo-концентрата

Для каждого температурного режима анализировали исходное питание селективной флотации, черновой молибденовый концентрат и хвосты основной операции. Дополнительно определяли качество концентратов перечисток, включая продукт 3-й перечистки. Mo и Cu рассматривались как основные технологические компоненты: Mo должен концентрироваться в пенном продукте, а Cu — преимущественно оставаться в камерном продукте. Анализы Au и Ag в основной операции использовали как дополнительные контрольные компоненты материального баланса.

Сопоставление режимов проводили по следующим критериям: содержание Mo в черновом и конечном молибденовых концентратах; остаточное содержание Mo в хвостах; содержание и извлечение Cu в черновой концентрат; расчетное извлечение Mo; содержание Cu в продукте 3-й перечистки; условное отношение Mo/Cu в конечном концентрате. Такое сочетание показателей позволяет отделить простое изменение массового выхода пены от фактического улучшения селективности разделения.

Согласно табл. 1 камерный продукт основной флотации является медным концентратом, который после обезвоживания поступает на металлургическое производство, а концентрат после перечистных операции в качестве молибденового промпродукта поступает на следующую стадии переработки. Расчетный выход чернового концентрата по Mo составляет 15,43; 14,21; 13,25 и 11,79 % соответственно при 75; 65; 50 и 40 °C. Выходы, независимо рассчитанные по Cu, Au и Ag, отличаются от Mo-баланса не более чем на 0,08 %, что можно объяснить округлением аналитических значений. Это позволяет корректно использовать рассчитанные извлечения для основной флотации. Для перечисток отсутствие пооперационных выходов остается ограничением исследования и исключает расчет их полного материального баланса.

Результаты

Результаты анализа продуктов основной молибденовой селективной флотации приведены в табл. 1. Полученные данные принципиально меняют интерпретацию процесса: по Mo наблюдается устойчивое улучшение показателей при снижении температуры, тогда как поведение Cu в черновом концентрате носит немонотонный характер. Поэтому выбор рационального режима должен основываться одновременно на материальном балансе основной операции и на качестве продукта после перечисток.

При снижении температуры от 75 до 40 °C содержание Mo в черновом концентрате последовательно повышается с 1,42 до 1,56; 1,76 и 2,06 %, то есть на 45,1 % относительно режима 75 °C. Одновременно расчетный выход чернового концентрата уменьшается с 15,43 до 11,79 %. Рост содержания Mo при уменьшении массового выхода свидетельствует не о простом увеличении массы пенного продукта, а о повышении степени концентрирования молибденита.

Содержание Mo в хвостах основной флотации уменьшается с 0,072 % при 75 °C до 0,068 % при 65 °C, 0,054 % при 50 °C и 0,042 % при 40 °C. По двухпродуктовому балансу извлечение Mo в черновой концентрат составляет соответственно 78,25; 79,17; 83,27 и 86,77 %. Таким образом, переход от 75 к 40 °C повышает извлечение Mo на 8,52 % при одновременном уменьшении выхода пенного продукта. Это является наиболее убедительным балансовым подтверждением положительного влияния охлаждения на основную молибденовую флотацию.

Поведение Cu в основной флотации отличается от Mo. Содержание Cu в черновом концентрате составляет 6,39 % при 75 °C, 15,09 % при 65 °C, 5,32 % при 50 °C и 7,51 % при 40 °C. Расчетное извлечение Cu в пенный продукт равно 6,48; 14,10; 4,63 и 5,82 % соответственно. Следовательно, минимальный перенос Cu в черновой молибденовый концентрат достигнут при 50 °C, а режим 65 °C характеризуется выраженным ростом перехода меди в пену. Это исключает линейную интерпретацию зависимости «чем ниже температура, тем сильнее депрессия Cu» на стадии основной флотации и указывает на сложное сочетание поверхностных и реагентных факторов.

Таблица 1

Состав продуктов основной селективной флотации молибдена при различных температурах

T, °C	Продукт	Mo, %	Cu, %	Au, г/т	Ag, г/т
75	исходное питание селективной флотации	0,28	15,21	14,78	32,14
	черновой молибденовый концентрат	1,42	6,39	1,24	0,10
	хвосты селективной флотации	0,072	16,82	17,25	37,99
65	исходное питание селективной флотации	0,28	15,21	14,78	32,14
	черновой молибденовый концентрат	1,56	15,09	0,10	0,10
	хвосты селективной флотации	0,068	15,23	17,21	37,45
50	исходное питание селективной флотации	0,28	15,21	14,78	32,14
	черновой молибденовый концентрат	1,76	5,32	0,10	0,10
	хвосты селективной флотации	0,054	16,72	17,02	37,03
40	исходное питание селективной флотации	0,28	15,21	14,78	32,14
	черновой молибденовый концентрат	2,06	7,51	0,10	0,10
	хвосты селективной флотации	0,042	16,24	16,74	36,42

По данным табл. 1 Au и Ag преимущественно остаются в хвостах основной молибденовой флотации. Расчетное извлечение Au в черновой концентрат не превышает 1,30 %, а Ag — 0,05 %. При этом содержания этих компонентов в пенном продукте близки к нижнему уровню представленных анализов, поэтому их температурную зависимость не следует интерпретировать как самостоятельный закономерный эффект без оценки аналитической погрешности и повторяемости опытов.

В совокупности данные основной флотации показывают, что снижение температуры до 40 °C обеспечивает максимальное извлечение Mo и минимальное остаточное содержание Mo в хвостах при меньшем массовом выходе концентрата. Однако по Cu наиболее благоприятный показатель основной операции получен при 50 °C. Следовательно, температурный режим нельзя выбирать только по содержанию Cu в черновом концентрате; необходимо учитывать последующее поведение материала в перечистном цикле.

Перечистные операции формируют окончательное качество молибденового продукта, поэтому температурный эффект оценивали также по продукту 3-й перечистки. Для исключения графической интерпретации неподтвержденных промежуточных массовых показателей на рис. 2 и 3 сопоставлены аналитически подтвержденные значения чернового концентрата основной флотации и конечного концентрата 3-й перечистки. Динамика Mo представлена на рис. 2, Cu — на рис. 3.

Сопоставление рис. 2 и 3 показывает важную особенность процесса. По Mo положительный эффект охлаждения проявляется уже в основной флотации и сохраняется после перечисток. По Cu, напротив, основная операция характеризуется немонотонной зависимостью, тогда как в концентрате 3-й перечистки содержание меди последовательно снижается с 10,30 до 9,54; 8,74 и 7,56 % по мере понижения температуры от 75 до 40 °C. Это означает, что преимущество режима 40 °C формируется как совокупный результат основной флотации и последующей перечистки, а не как простое линейное усиление депрессии Cu на первой стадии.

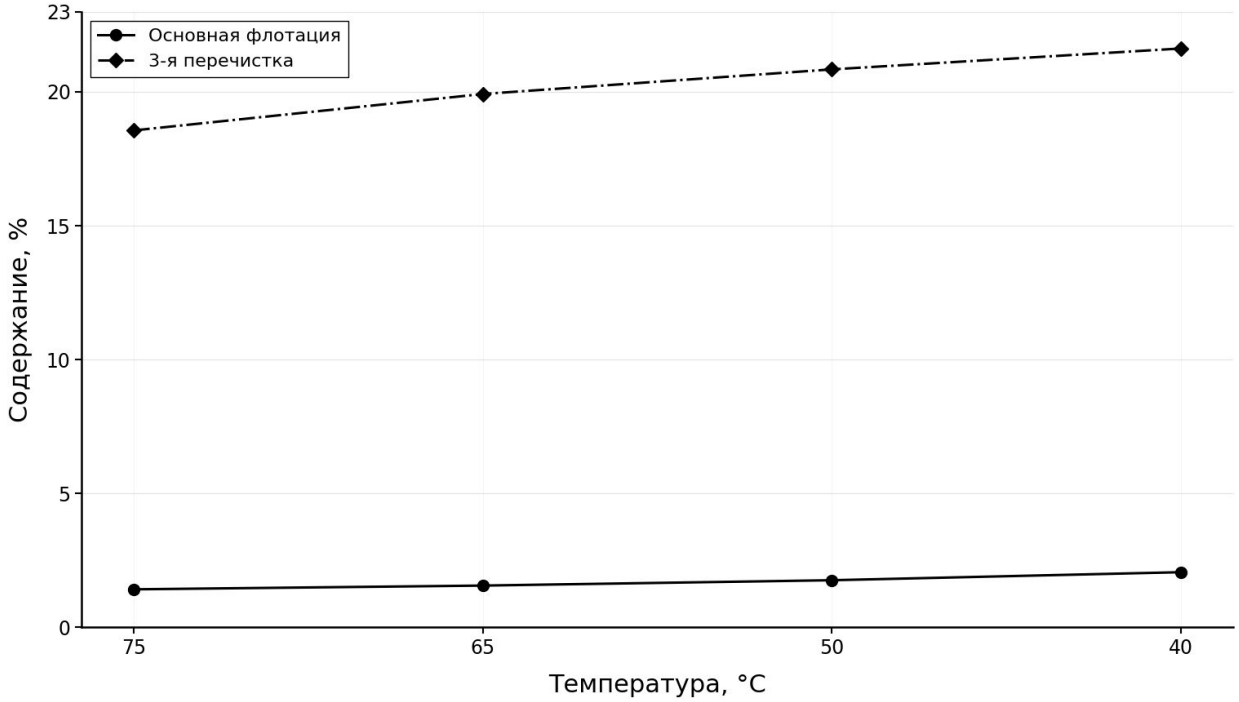


Рис. 2. Влияние температуры на содержание Mo в черновом концентрате основной флотации и концентрате 3-й перечистки

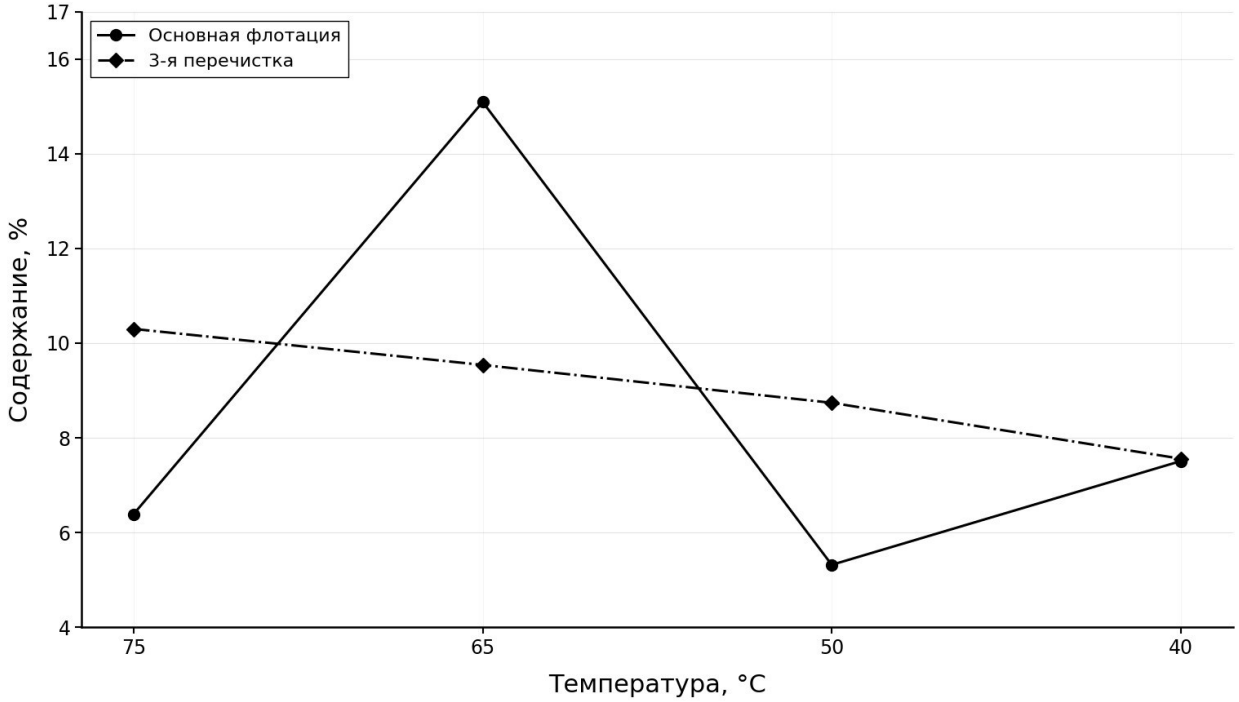


Рис. 3. Влияние температуры на содержание Cu в черновом концентрате основной флотации и концентрате 3-й перечистки

Таблица 2

Качество конечного молибденового концентрата 3-й перечистки и индекс селективности

T, °C	Mo, %	Cu, %	Au, г/т	Ag, г/т	Mo/Cu
75	18,56	10,30	31,20	156,40	1,80
65	19,92	9,54	30,08	154,50	2,09
50	20,84	8,74	28,94	145,20	2,38
40	21,62	7,56	29,20	156,40	2,86

Условное отношение Mo/Cu в концентрате 3-й перечистки возрастает от 1,80 при 75 °C до 2,09 при 65 °C, 2,38 при 50 °C и 2,86 при 40 °C. Относительно режима 75 °C содержание Mo в конечном продукте при 40 °C повышается на 16,5 %, содержание Cu снижается на 26,6 %, а отношение Mo/Cu возрастает на 58,9 %. Для дополнительной балансовой оценки на рис. 4 приведены расчетные извлечения Mo и Cu в черновой концентрат основной флотации. Они показывают, что рост извлечения Mo при охлаждении сопровождается в целом низким, но немонотонным извлечением Cu, что подтверждает необходимость совместной оценки основной и перечистных операций.

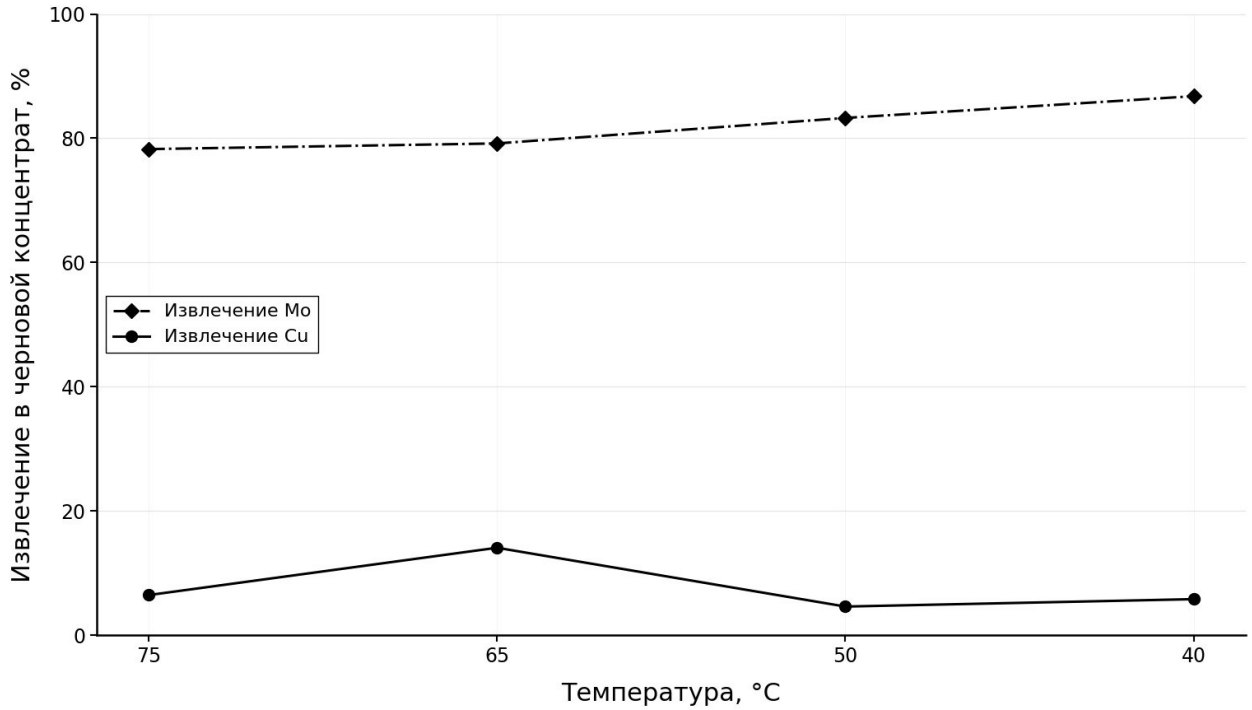


Рис. 4. Расчетное извлечение Mo и Cu в черновой молибденовый концентрат основной флотации при различных температурах

Снижение содержания Cu в конечном продукте при понижении температуры может быть связано с тем, что основная десорбционная функция пропарки реализуется на предварительной стадии, а дальнейшее поддержание высокой температуры не дает дополнительного преимущества для селекции. После охлаждения могут стабилизироваться различия в поверхностном состоянии молибденита и медных сульфидов и изменяться кинетика взаимодействия минералов с депрессорами. Вместе с тем полученные данные сами по себе не позволяют однозначно установить молекулярный механизм эффекта; для этого необходимы специальные исследования поверхностного состава и адсорбции реагентов.

Даже при 40 °C содержание Mo в концентрате 3-й перечистки составляет 21,62 %, поэтому полученный продукт следует рассматривать как промежуточный, требующий дальнейшей доводки до требований, предъявляемых к товарному молибденовому концентрату. Задача настоящего этапа заключалась не в получении окончательно кондиционного продукта, а в выявлении температурного режима, создающего наиболее благоприятные условия для последующего повышения качества путем оптимизации числа перечисток, реагентного режима, крупности, плотности пульпы и времени кондиционирования.

Содержания Au и Ag в продукте 3-й перечистки изменяются в широком диапазоне и существенно превышают их уровни в черновом концентрате. Поскольку массовые выходы промежуточных перечистных продуктов не фиксировались, эти значения не использовались для расчета извлечений и не рассматриваются как доказательство температурной закономерности. Для корректной интерпретации поведения благородных металлов требуется отдельный

пооперационный баланс с контрольным опробованием и повторным анализом продуктов.

Полученные результаты согласуются с представлением о функциональном различии между тепловой подготовкой и собственно селективной флотацией. Повышенная температура на стадии пропарки способствует изменению состояния остаточных реагентных слоев на поверхности медных сульфидов и подготавливает их к депрессии. После выполнения этой функции дальнейшее удержание пульпы при высокой температуре может оказаться избыточным. Экспериментально наблюдаемое увеличение извлечения Mo при охлаждении согласуется с гипотезой о более благоприятном сохранении флотируемости молибденита, однако причинный механизм требует самостоятельного физико-химического подтверждения [9–13, 17, 18].

Молибденит MoS_2 характеризуется слоистой кристаллической структурой и анизотропией поверхностных свойств. Гидрофобные базальные плоскости обеспечивают естественную флотируемость минерала, тогда как кромочные зоны более реакционноспособны и взаимодействуют с кислородом, гидроксильными группами, ионами Ca^{2+}, Mg^{2+} и другими компонентами жидкой фазы. Изменение температуры способно влиять на скорость этих процессов и на состав поверхностных слоев, особенно в щелочной среде и при наличии тонкодисперсных частиц [9, 12–16].

Температура влияет также на реагентную среду: скорость окисления сульфидных поверхностей, равновесие растворенных и гидроксокомплексных форм, устойчивость адсорбционных слоев и пенообразование. Поэтому наблюдаемая температурная зависимость является результатом совокупности физико-химических факторов и не должна сводиться только к одному механизму. Для промышленной оптимизации температурный режим необходимо исследовать совместно с pH, расходом депрессора, остаточной концентрацией собирателя, ионным составом оборотной воды и гранулометрией питания [14–18].

С технологической точки зрения результаты обосновывают двухстадийный подход: сначала высокотемпературная обработка используется для подготовки коллективного концентрата, затем пульпа регулируемо охлаждается перед селективной молибденовой флотацией. В исследованиях такое разделение функций позволило при 40 °C получить максимальное извлечение Mo в основной операции и одновременно наилучшее качество концентрата 3-й перечистки.

Температура 40 °C является наиболее благоприятной среди исследованных режимов по совокупности критериев, но ее нельзя считать универсальным оптимумом для всех Cu–Mo-концентратов. Важно, что на основной стадии минимальное извлечение Cu получено при 50 °C, а при 65 °C наблюдалось его локальное увеличение. Это указывает на нелинейность процесса и необходимость опытов в более узком диапазоне 40–50 °C, например с шагом 2,5–5 °C, при одновременном контроле pH и расхода реагентов. Положение оптимума может изменяться в зависимости от минералогии сырья, степени окисленности, содержания шламов и состава оборотной воды.

Для промышленной схемы практический интерес представляет вариант, при котором пропарка сохраняется при 80–85 °C, после чего пульпа охлаждается до ориентировочно 40–45 °C и только затем направляется в основную молибденовую флотацию и перечистки. Технически это может быть реализовано посредством теплообменного аппарата, охлаждающей емкости или регулируемого промежуточного выдерживания. Выбор конкретного решения должен выполняться после определения расхода пульпы, ее теплоемкости, допустимого времени пребывания и возможностей рекуперации тепла.

Внедрение охлаждения необходимо оценивать совместно с энергетическим, водным и шламовым балансами. Потенциальный технологический эффект состоит в повышении извлечения Mo, улучшении качества конечного перечистного продукта и возможном снижении нагрузки на последующие доводочные операции. Однако экономическая целесообразность может быть подтверждена только опытно-промышленными испытаниями с измерением фактических тепловых затрат, пооперационных выходов, потерь металлов и влияния температуры оборотной воды.

Практическая значимость работы состоит в том, что температура пульпы после пропарки рассматривается как самостоятельный управляемый параметр селективной флотации, а ее влияние подтверждено не только изменением содержаний, но и согласованным двухпродуктовым балансом основной операции. Ограничением исследования является отсутствие массовых выходов по перечисткам и статистической оценки повторяемости; эти данные необходимо получить на следующем этапе для окончательной верификации рационального режима.

Заключение

Анализ экспериментальных данных позволяет сформулировать следующие выводы. Двухпродуктовый баланс основной селективной флотации согласуется по Mo, Cu, Au и Ag: расчетные выходы, полученные по отдельным компонентам, различаются не более чем на 0,08 процентного пункта. При снижении температуры от 75 до 40 °C выход чернового концентрата уменьшается с 15,43 до 11,79 %, содержание Mo в нем возрастает с 1,42 до 2,06 %, содержание Mo в хвостах снижается с 0,072 до 0,042 %, а извлечение Mo повышается с 78,25 до 86,77 %.

Влияние температуры на переход Cu в черновой концентрат является немонотонным: извлечение Cu составляет 6,48 % при 75 °C, 14,10 % при 65 °C, 4,63 % при 50 °C и 5,82 % при 40 °C. Поэтому режим 40 °C нельзя обосновывать минимальным содержанием Cu только на стадии основной флотации. Его преимущество проявляется по совокупному результату после перечисток: в концентрате 3-й перечистки при 40 °C получено 21,62 % Mo и 7,56 % Cu, а условное отношение Mo/Cu достигает 2,86 против 1,80 при 75 °C.

Полученная зависимость подтверждает целесообразность разделения функций тепловой подготовки и селективной флотации. Пропарка при повышенной температуре используется для подготовки поверхности медных минералов к депрессии, а последующее регулируемое охлаждение создает более благоприятные условия для извлечения молибденита. При этом экспериментальные данные подтверждают технологический эффект, но не являются прямым доказательством конкретного молекулярного механизма; для его установления необходимы измерения ОВП, состава жидкой фазы и состояния минералогической поверхности.

Для исследованного коллективного Cu–Mo-концентрата температуру около 40 °C целесообразно принять в качестве исходного режима опытно-промышленных испытаний, а диапазон 40–50 °C дополнительно исследовать с меньшим шагом температуры. При дальнейшей проверке необходимо фиксировать пооперационные массовые выходы и извлечения Mo и Cu, выполнять повторные опыты и статистическую оценку, контролировать pH, ОВП, расход и остаточную концентрацию реагентов, а также рассчитывать тепловой и экономический баланс. Только после такой верификации режим охлаждения может быть рекомендован для включения в промышленный регламент.

Библиографический список:

1. Абрамов, А. А. Флотационные методы обогащения : учебник / А. А. Абрамов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Горная книга, 2016. - 595 с. - ISBN 978-5-98672-413-3.
2. Абрамов, А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов : учебное пособие. Т. III, кн. 1. Рудоподготовка и Cu, Cu–Py, Cu–Fe, Mo, Cu–Mo, Cu–Zn руды / А. А. Абрамов. - Москва : Изд-во МГГУ, 2005. - 575 с.
3. Глембоцкий, В. А. Флотация / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. - Москва : Недра, 1973. - 384 с.
4. Глембоцкий, В. А. Флотационные методы обогащения : учебник для вузов / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Недра, 1981. - 304 с.
5. Митрофанов, С. И. Селективная флотация / С. И. Митрофанов. - Москва : Недра, 1967. - 584 с.
6. Игнаткина, В. А. Флотация медно-порфировых руд с использованием различных собирателей и пенообразователей / В. А. Игнаткина, В. А. Бочаров, Л. С. Хачатрян // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - № 2. - С. 321–329.
7. Yushina, T. I. Analysis of technological schemes and substantiation of the selection of the reagent regimes for copper-molybdenum ores flotation / T. I. Yushina, B. Purev, K. D'Elia, B. Namuungerel // Non-ferrous Metals. - 2019. - No. 1. - P. 3–11. - DOI 10.17580/nfm.2019.01.014.
8. Semushkina, L. Improving the Copper-Molybdenum Ores Flotation Technology Using a Combined Collecting Agent / L. Semushkina, G. Abdykirova, A. Mukhanova, A. Mukhamedilova // Minerals. - 2022. - Vol. 12, No. 11. - Article 1416. - DOI 10.3390/min12111416.
9. Castro, S. Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability / S. Castro, A. López-Valdivieso, J. S. Laskowski // International Journal of Mineral Processing. - 2016. - Vol. 148. - P. 48–58. - DOI 10.1016/j.minpro.2016.01.003.
10. Park, I. A review of recent advances in depression techniques for flotation separation of Cu–Mo sulfides in porphyry copper deposits / I. Park, S. Hong, S. Jeon, M. Ito, N. Hiroyoshi // Metals. - 2020. - Vol. 10, No. 9. - Article 1269. - DOI 10.3390/met10091269.
11. Hao, J. Depressants for separation of chalcopyrite and molybdenite: review and prospects / J. Hao, J. Liu, Y. Yu, H. Gao, X. Qin, X. Bai // Minerals Engineering. - 2023. - Vol. 201. - Article 108209. - DOI 10.1016/j.mineng.2023.108209.
12. Yang, B. Effect of particle size on the contact angle of molybdenite powders / B. Yang, S. Song, A. López-Valdivieso // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. - 2014. - Vol. 35, No. 3. - P. 208–215. - DOI 10.1080/08827508.2013.763802.
13. Lu, Z. Probing Anisotropic Surface Properties of Molybdenite by Direct Force Measurements / Z. Lu, Q. Liu, Z. Xu, H. Zeng // Langmuir. - 2015. - Vol. 31, No. 42. - P. 11409–11418. - DOI 10.1021/acs.langmuir.5b02678.
14. Lucay, F. Study of the natural floatability of molybdenite fines in saline solutions and effect of gypsum precipitation / F. Lucay, L. A. Cisternas, E. D. Gálvez, A. López-Valdivieso // Minerals & Metallurgical Processing. - 2015. - Vol. 32, No. 4. - P. 203–208. - DOI 10.1007/BF03402476.
15. Laskowski, J. S. Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu–Mo sulfide ore / J. S. Laskowski, S. Castro, O. Ramos // Physicochemical Problems of Mineral Processing. - 2014. - Vol. 50, No. 1. - P. 17–29. - DOI 10.5277/ppmp140102.
16. Liu, W. A review of the effect of water quality on flotation / W. Liu, C. J. Moran, S. Vink // Minerals Engineering. - 2013. - Vol. 53. - P. 91–100. - DOI 10.1016/j.mineng.2013.07.011.
17. Park, C. H. The effect of sodium silicate as pH modifier and depressant in the froth flotation of molybdenite ores / C. H. Park, H. S. Jeon // Materials Transactions. - 2010. - Vol. 51, No. 7. - P. 1367–1369. - DOI 10.2320/matertrans.M2009397.
18. Lv, X. Mechanisms for selective flotation separation of chalcopyrite and molybdenite using the novel depressant 2-(carbamimidoylthio) acetic acid: experimental and DFT study / X. Lv, A. Luo, X. Tong, J. Chen, J. Sheng // Chemical Engineering Journal Advances. - 2025. - Article 100760. - DOI 10.1016/j.ceja.2025.100760.



Шакаров Тулкин Исматович – доцент кафедры «Металлургия», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», кандидат технических наук, доцент
E-mail: shakarovtulkin@gmail.com
ORCID: 0009-0001-7433-904

Tulkin Ismatovich Shakarov – Associate Professor of the Department of Metallurgy, Almalyk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS", Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: shakarovtulkin@gmail.com
ORCID: 0009-0001-7433-904

Shakarov Tulqin Ismatovich – "Metallurgiya" kafedrasi dotsenti, Milliy tadqiqotlar texnologiya universiteti «MISIS»ning Olmaliq filiali, texnika fanari nomzodi, dotsent
E-mail: shakarovtulkin@gmail.com
ORCID: 0009-0001-7433-904



Эралиев Даврон Кучкар угли – магистрант, Передовая инженерная школа « ГеоТехМет» Алмалыкского филиала НИТУ «МИСИС»
E-mail: boyituvchi.9393@gmail.com
ORCID: 0009-0004-7384-8077

Davron Kuchkar ugli Eraliev – Master's student, Advanced Engineering School "GeoTechMet" of the Almalyk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: boyituvchi.9393@gmail.com
ORCID: 0009-0004-7384-8077

Eraliyev Davron Quchqar o'g'li – magistrant, «GeoTechMet» Ilg'or muhandislik maktabi, Milliy tadqiqotlar texnologiya universiteti «MISIS»ning Olmaliq filiali
E-mail: boyituvchi.9393@gmail.com
ORCID: 0009-0004-7384-8077



Масидиков Шерзад Абдурасулович – стажер-исследователь Алмалыкского филиала НИТУ «МИСИС»
E-mail: sh.masidikov@agmk.uz
ORCID: 0009-0001-7433-9045

Sherzod Abdurasulovich Masidikov – Research Intern at the *Almalyk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS"*
E-mail: sh.masidikov@agmk.uz
ORCID: 0009-0001-7433-9045

Masidikov Sherzod Abdurasulovich – stajyor-tadqiqotchi, Milliy tadqiqotlar texnologiya universiteti «MISIS»ning Olmaliq filiali
E-mail: sh.masidikov@agmk.uz
ORCID: 0009-0001-7433-9045



UO‘K 622.765 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.2

SULFIDLI RUDALARNI BOYITISHDA EKOLOGIK XAVFSIZ REAGENTLARDAN FOYDALANISH ISTIQBOLLARI

A.A. Xasanov, X.B. Xojimuratova

Olmaliq davlat texnika instituti, O’zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Mazkur maqolada sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish istiqbollari tahlil qilingan. Tadqiqotning dolzarbligi kon-metallurgiya sanoatida ekologik xavfsizlik talablarining ortib borishi hamda an’anaviy flotatsiya reagentlarining atrof-muhitga salbiy ta’sirini kamaytirish zarurati bilan izohlanadi. Ishning maqsadi sulfidli rudalarni boyitishda qo‘llanilayotgan ekologik xavfsiz reagentlarning texnologik va ekologik samaradorligini baholash hamda ularni sanoat amaliyotida qo‘llash istiqbollarini aniqlashdan iborat.*

Tadqiqot davomida mahalliy va xorijiy ilmiy manbalar tahlil qilinib, ekologik xavfsiz reagentlarning flotatsiya jarayonidagi roli, selektivlikka ta’siri, foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish samaradorligi va chiqindi suvlar tarkibidagi zararli moddalarning kamayishiga ta’siri o‘rganildi. Biologik parchalanadigan kollektorlar, tabiiy polimerlar va biomolekulalar asosidagi reagentlarning texnologik imkoniyatlari an’anaviy reagentlar bilan qiyosiy baholandi.

Tahlil natijalari ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish flotatsiya jarayonining ekologik samaradorligini oshirish, chiqindi suvlarning toksiklik darajasini kamaytirish va atrof-muhitga salbiy ta’sirni cheklash imkonini berishini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, ayrim ekologik reagentlar foydali minerallarning selektiv ajralishini yaxshilashi va boyitish jarayonining barqarorligini ta’minlashi aniqlandi. Tadqiqotning ilmiy yangiligi ekologik xavfsiz reagentlarning sulfidli rudalarni boyitishdagi texnologik va ekologik afzalliklarini kompleks baholash hamda ularni qo‘llashning istiqbolli yo‘nalishlarini tizimli ravishda umumlashtirishdan iborat. Olingan natijalar zamonaviy “yashil” texnologiyalarni boyitish korxonalarida joriy etish uchun ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: *sulfidli rudalar, flotatsiya, ekologik xavfsiz reagentlar, biologik parchalanadigan reagentlar, flotatsiya selektivligi, kollektor reagentlar, foydali qazilmalarni boyitish, konsentrat sifati, chiqindi suvlar, ekologik xavfsizlik, yashil texnologiyalar, mineral xomashyo.*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РЕАГЕНТОВ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Хасанов А.А., Ходжимуратова Х.Б.

Алмалыкский государственный технический институт, Республика Узбекистан

Аннотация. *В статье проведён анализ перспектив применения экологически безопасных реагентов при флотационном обогащении сульфидных руд. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к экологической безопасности горно-металлургического производства и необходимостью снижения негативного воздействия традиционных флотационных реагентов на окружающую среду. Целью работы является оценка технологической и экологической эффективности экологически безопасных реагентов, используемых при обогащении сульфидных руд, а также определение перспектив их промышленного применения.*

В ходе исследования были проанализированы отечественные и зарубежные научные публикации, посвящённые использованию экологически безопасных реагентов в процессах флотации. Рассмотрены их влияние на селективность флотационного разделения, эффективность извлечения полезных компонентов в концентрат, а также на снижение содержания токсичных веществ в сточных водах. Выполнена сравнительная оценка технологических возможностей биоразлагаемых собирателей, природных полимеров и реагентов на основе биомолекул по сравнению с традиционными флотационными реагентами.

Результаты анализа показали, что применение экологически безопасных реагентов способствует повышению экологической эффективности процессов обогащения, снижению токсичности сточных вод и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Установлено, что отдельные виды экологически безопасных реагентов способны улучшать селективность флотации и обеспечивать стабильность технологических показателей процесса. Научная новизна работы заключается в комплексной оценке технологических и экологических преимуществ экологически безопасных реагентов при обогащении сульфидных руд и систематизации перспективных направлений их применения. Полученные результаты могут служить научно-практической основой для внедрения современных «зелёных» технологий на обогатительных предприятиях.

Ключевые слова: *сульфидные руды, флотация, экологически безопасные реагенты, биоразлагаемые реагенты, селективность флотации, реагенты-собиратели, обогащение полезных ископаемых, качество концентрата, сточные воды, экологическая безопасность, зеленые технологии, минеральное сырье.*

PROSPECTS FOR THE USE OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY REAGENTS IN SULFIDE ORE BENEFICIATION

A.A. Khasanov, X.B. Xojimuratova

Almalyk State Technical Institute, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This paper analyzes the prospects for the use of environmentally friendly reagents in the flotation beneficiation of sulfide ores. The relevance of the study is associated with the growing environmental requirements in the mining and metallurgical industry and the need to reduce the negative impact of conventional flotation reagents on the environment. The aim of the research is to evaluate the technological and environmental efficiency of environmentally friendly reagents used in sulfide ore beneficiation and to determine their prospects for industrial application.*

The study is based on a comprehensive analysis of domestic and international scientific publications devoted to the use of environmentally friendly reagents in flotation processes. Particular attention was paid to their influence on flotation selectivity, recovery of valuable components into concentrate, and reduction of toxic substances in wastewater. A comparative assessment of biodegradable collectors, natural polymers, and biomolecule-based reagents was carried out in comparison with conventional flotation reagents.

The analysis demonstrated that the application of environmentally friendly reagents contributes to improving the environmental performance of beneficiation processes, reducing wastewater toxicity, and minimizing adverse environmental impacts. It was found that certain types of environmentally friendly reagents can enhance flotation selectivity and ensure stable technological performance. The scientific novelty of the study liesin the comprehensive assessment of the technological and environmental advantages of environmentally friendly reagents in sulfide ore beneficiation and in the systematization of promising directions for their application. The obtained results may serve as a scientific and practical basis for the implementation of modern green technologies at mineral processing enterprises.

Key words: *Sulfide ores, flotation, environmentally friendly reagents, biodegradable reagents, flotation selectivity, collector reagents, mineral beneficiation, concentrate quality, wastewater, environmental safety, green technologies, mineral raw materials.*

Kirish

Dunyo miqyosida mineral xomashyodan oqilona foydalanish, foydali komponentlarni maksimal darajada ajratib olish hamda boyitish korxonalarining ekologik xavfsizligini ta'minlash kon-metallurgiya sanoatining ustuvor vazifalaridan biri hisoblanadi [1, 4, 6] . Sulfidli rudalar mis, qo'rg'oshin, rux, molibden va boshqa qimmatbaho metallarning asosiy manbai bo'lib, ularni boyitishda flotatsiya usuli eng samarali texnologiyalardan biri sifatida keng qo'llaniladi [2, 3, 6]. Flotatsiya jarayonining samaradorligi ko'p jihatdan qo'llaniladigan reagentlarning xususiyatlariga bog'liq bo'lib, ular mineral zarrachalar yuzasining fizik-kimyoviy holatini o'zgartirish orqali foydali komponentlarni ajratib olish imkonini beradi [2, 3, 5].

An'anaviy flotatsiya reagentlari, xususan ksantogenatlar, ditiofosfatlar va ayrim organik kollektorlar yuqori texnologik samaradorlikka ega bo'lishiga qaramasdan, ularning ko'pchiligi toksik xususiyatlarga ega bo'lib, chiqindi suvlar va ishlab chiqarish chiqindilari orqali atrof-muhitga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin [2, 5, 6]. Boyitish korxonalarida katta hajmdagi reagentlarning qo'llanilishi suv havzalari, tuproq qoplami va biologik ekotizimlarning ifloslanishiga olib kelishi ehtimoli mavjud [1, 4, 9]. Shu sababli so'nggi yillarda ekologik xavfsiz va biologik parchalanadigan reagentlarni yaratish hamda ularni sanoat amaliyotiga joriy etish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar jadallashmoqda [7, 8, 9].

Xorijiy va mahalliy tadqiqotchilar tomonidan olib borilgan ilmiy ishlarda aminokislotalar asosidagi kollektorlar, tabiiy polimerlar, o'simlik ekstraktlari va biomolekulalar asosidagi reagentlarning flotatsiya jarayonlaridagi qo'llanilish imkoniyatlari keng o'rganilgan [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, ekologik xavfsiz reagentlar ayrim hollarda an'anaviy ksantogenat va ditiofosfatlar bilan taqqoslanadigan texnologik ko'rsatkichlarni ta'minlay oladi [7, 8]. Shu bilan birga, ularning qo'llanilishi chiqindi suvlarning toksiklik darajasini pasaytirish, atrof-muhitga salbiy ta'sirni kamaytirish hamda boyitish korxonalarining ekologik barqarorligini oshirish imkonini beradi [1, 4, 9]. Biroq ekologik xavfsiz reagentlarning selektivlik mexanizmlari, turli mineralogik tarkibli rudalar uchun qo'llash sharoitlari va sanoat miqyosidagi iqtisodiy samaradorligi bo'yicha ma'lumotlar hali yetarli darajada umumlashtirilmagan. Shu sababli mazkur yo'nalishda kompleks ilmiy tadqiqotlar olib borish dolzarb ahamiyat kasb etadi.

Mazkur muammo sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanishning texnologik va ekologik jihatlarini chuqur tahlil qilish zaruratini yuzaga keltirmoqda. Shu munosabat bilan ushbu tadqiqotning maqsadi sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitishda qo'llanilayotgan ekologik xavfsiz reagentlarning afzalliklari, kamchiliklari va amaliy qo'llash istiqbollarini ilmiy manbalar asosida baholashdan iborat. Tadqiqot vazifalari sifatida ekologik xavfsiz reagentlarning asosiy turlarini tavsiflash, ularning flotatsiya selektivligiga va foydali komponentlarning ajralib chiqish ko'rsatkichlariga ta'sirini tahlil qilish hamda boyitish korxonalarida qo'llashning istiqbolli yo'nalishlarini aniqlash belgilandi [10, 11, 12].

Materiallar va tadqiqot usullari

Tadqiqotning metodologik asosini sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish bo'yicha mahalliy va xorijiy ilmiy manbalarni tahlil qilish tashkil etdi [1–12]. Tadqiqot jarayonida flotatsiya texnologiyalari, ekologik xavfsiz reagentlar, biologik parchalanadigan kollektorlar va tabiiy polimerlarning boyitish jarayonlaridagi qo'llanilishiga bag'ishlangan ilmiy maqolalar, monografiyalar hamda xalqaro ilmiy jurnallarda chop etilgan tadqiqot natijalari o'rganildi [2, 3, 5, 6].

Ma'lumotlarni yig'ish va tahlil qilishda qiyosiy tahlil, tizimli yondashuv va ilmiy umumlashtirish usullaridan foydalanildi [2, 3, 6]. Tadqiqot davomida an'anaviy flotatsiya reagentlari hamda ekologik xavfsiz reagentlarning texnologik va ekologik ko'rsatkichlari solishtirildi. Bunda reagentlarning flotatsiya selektivligi, foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish darajasi, chiqindi suvlarning toksiklik ko'rsatkichlari va biodegradatsiya xususiyatlariga alohida e'tibor qaratildi [1, 4, 7, 8].

Shuningdek, ekologik xavfsiz reagentlarning qo'llanilishi natijasida boyitish jarayonining samaradorligi va atrof-muhitga ta'sirini baholash uchun ilmiy adabiyotlarda keltirilgan ma'lumotlar tizimlashtirildi hamda umumlashtirildi [7, 8, 9]. Olingan natijalar ekologik xavfsiz rea-

gentlardan foydalanish istiqbollarini baholash va ularning amaliy qo‘llanilish imkoniyatlarini aniqlash uchun asos bo‘lib xizmat qildi [10, 11, 12].

Tahlil uchun ilmiy manbalarni tanlashda ularning sulfidli minerallar flotatsiyasiga bevosita aloqadorligi, ekologik xavfsiz yoki biologik parchalanadigan reagentlarning qo‘llanilishi, reagentlarning flotatsiya selektivligi va foydali komponentlarning ajralib chiqish ko‘rsatkichlariga ta’siri hamda ularning ekologik xususiyatlari to‘g‘risida ma’lumotlarning mavjudligi asosiy mezon sifatida qabul qilindi. Reagentlarni tanlashda esa ularning sulfidli minerallar flotatsiyasida qo‘llanish imkoniyati, tabiiy yoki biologik parchalanadigan manbalardan olinishi, an’anaviy flotatsiya reagentlariga muqobil sifatida o‘rganilganligi hamda texnologik va ekologik ko‘rsatkichlari ilmiy manbalarda yoritilganligi hisobga olindi. Tahlilda aminokislotalar asosidagi kollektorlar, tabiiy polimerlar, o‘simlik ekstraktlari va biomolekulalar asosidagi reagentlarga alohida e’tibor qaratildi. Olingan ma’lumotlar qiyosiy-tahliliy yondashuv asosida umumlashtirildi.

Tadqiqot natijalari

O‘tkazilgan tahlillar natijalari sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish zamonaviy boyitish texnologiyalarining istiqbolli yo‘nalishlaridan biri ekanligini ko‘rsatdi [1, 4, 9]. An’anaviy flotatsiya reagentlari yuqori texnologik samaradorlikka ega bo‘lishiga qaramasdan, ularning ayrim turlari chiqindi suvlarning toksikligini oshirishi va atrof-muhitga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin [2, 5, 6]. Shu sababli ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish masalasi nafaqat texnologik, balki ekologik jihatdan ham muhim ahamiyat kasb etadi [1, 4].

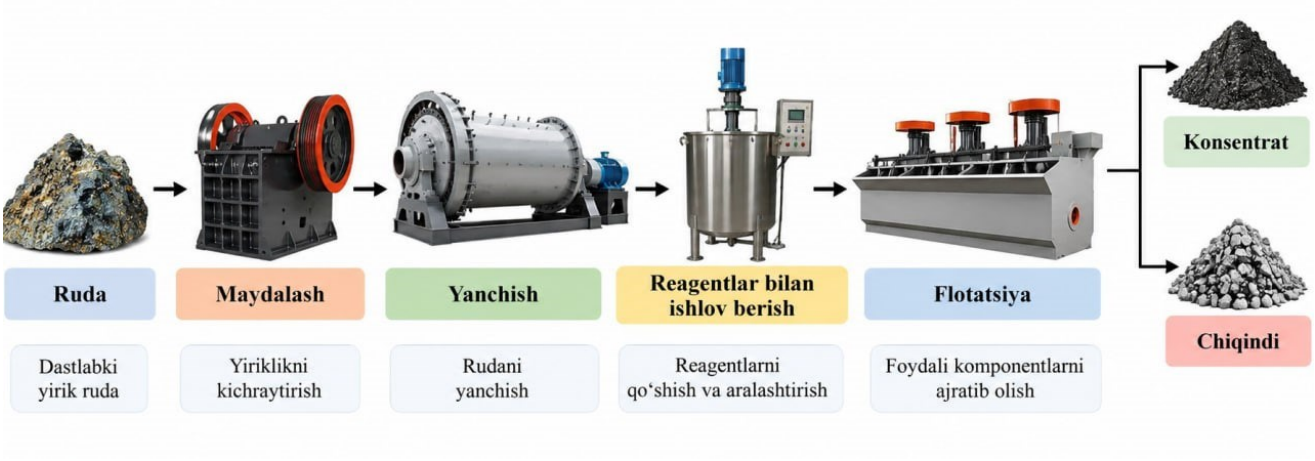
Tahlil qilingan ilmiy manbalarga ko‘ra, biologik parchalanadigan kollektorlar va tabiiy polimerlar asosidagi reagentlar flotatsiya jarayonining selektivligini saqlab qolgan holda ekologik xavfni kamaytirish imkonini beradi [7, 8, 9]. Bunday reagentlar chiqindi suvlar tarkibidagi zararli organik birikmalar miqdorini kamaytiradi hamda suv resurslarini qayta ishlatish imkoniyatlarini kengaytiradi [1, 7, 9].

Shuningdek, ayrim tadqiqotlarda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish natijasida foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish ko‘rsatkichlari an’anaviy reagentlar bilan taqqoslanadigan darajada ekanligi qayd etilgan [7, 8]. Bu esa ekologik talablarga javob beradigan yangi reagentlarni ishlab chiqish va amaliyotga joriy etish uchun keng imkoniyatlar yaratadi [4, 7, 8].

Biroq ekologik xavfsiz reagentlarning ayrim turlari sanoat miqyosida yetarli darajada sinovdan o‘tkazilmaganligi hamda ularning iqtisodiy samaradorligi bo‘yicha ma’lumotlar cheklanganligi mazkur yo‘nalishdagi tadqiqotlarning asosiy kamchiliklari hisoblanadi [7, 8, 9]. Kelgusida ekologik xavfsiz reagentlarning turli mineral tarkibli rudalar uchun qo‘llanilish imkoniyatlarini chuqurroq o‘rganish va sanoat sharoitida sinovdan o‘tkazish maqsadga muvofiqdir [10, 11, 12].

Sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanishning texnologik imkoniyatlari va ekologik samaradorligini baholash maqsadida mavjud ilmiy manbalar, amaliy tajribalar hamda zamonaviy flotatsiya texnologiyalari tahlil qilindi. Olingan natijalar ekologik xavfsiz reagentlarning boyitish jarayonlarida samarali qo‘llanish imkoniyatiga ega ekanligini ko‘rsatdi [10, 11, 12].

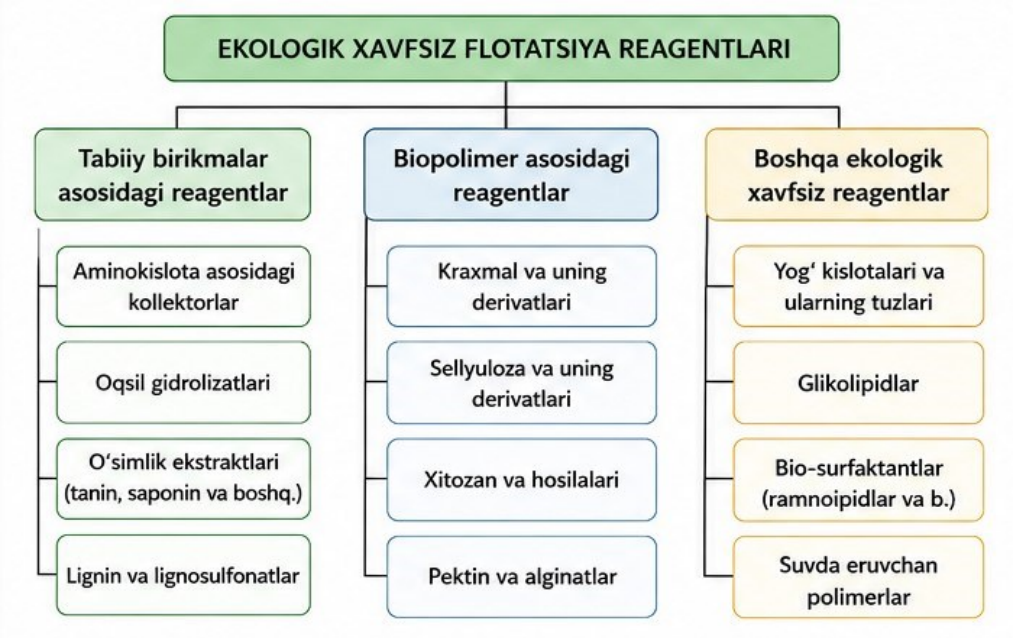
Sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitish jarayoni bir nechta asosiy texnologik bosqichlardan iborat bo‘lib, ularning o‘zaro bog‘liqligi 1-rasmda keltirilgan. Ushbu sxemada rudani maydalash, yanchish, reagentlar bilan ishlov berish va flotatsiya bosqichlari ketma-ket amalga oshirilishi ko‘rsatilgan. Flotatsiya jarayonining samaradorligi ko‘p jihatdan qo‘llaniladigan reagentlarning xossalariga bog‘liq bo‘lib, ular foydali minerallarning yuzasini gidrofoblashtirish orqali ularning konsentrat tarkibiga o‘tishini ta’minlaydi [2, 3, 5, 6].



1-rasm. Sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitish jarayoni sxemasi

1-rasmda ko‘rsatilgan texnologik sxema tahlili shuni ko‘rsatadiki, ekologik xavfsiz reagentlarni mavjud boyitish texnologiyalariga qo‘llash qo‘shimcha murakkab texnologik o‘zgarishlarni talab qilmaydi. Ayniqsa, kollektorlar va ko‘pik hosil qiluvchi reagentlarning ekologik xavfsiz turlaridan foydalanish chiqindi suvlar tarkibidagi zararli moddalar miqdorini kamaytirishga xizmat qiladi. Bundan tashqari, sxemada ko‘rsatilgan aylanma suv tizimi suv resurslaridan samarali foydalanish imkonini yaratadi.

Ekologik xavfsiz flotatsiya reagentlarining tarkibi va tasnifi 2-rasmda keltirilgan. Tahlil qilingan ilmiy manbalarga ko‘ra, ekologik jihatdan istiqbolli reagentlar qatoriga aminokislotalar asosidagi kollektorlar, tabiiy polimerlar, biomolekulalar va boshqa muqobil reagentlar kiradi. Tabiiy kelib chiqish va biologik parchalanish xususiyati reagentning ekologik afzalliklarini belgilovchi muhim omillardan biri bo‘lsa-da, ushbu xususiyatlarning o‘zi reagentning barcha texnologik va ekologik sharoitlarda to‘liq xavfsizligini anglatmaydi. Reagentlarning ekologik xavfsizligini baholashda ularning toksikligi va ekotoksikligi, biodegradatsiya darajasi, parchalanish mahsulotlarining xususiyatlari, qo‘llaniladigan konsentratsiyasi hamda flotatsiya muhitidagi boshqa komponentlar bilan o‘zaro ta’siri ham hisobga olinishi lozim. Shu sababli ekologik xavfsiz reagentlarni tanlash ularning kelib chiqishiga emas, balki texnologik samaradorligi va ekologik xususiyatlarini kompleks baholash natijalariga asoslanishi maqsadga muvofiq.



2-rasm. Ekologik xavfsiz flotatsiya reagentlarining tasnifi

2-rasmda ko'rsatilgan reagentlar orasida aminokislotalar asosidagi kollektorlar va tabiiy polimerlar eng istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Ular mineral zarrachalarning flotatsion faolligini saqlab qolgan holda ekologik xavfni kamaytirishga yordam beradi. Shuningdek, biomolekulalar asosidagi reagentlar selektivlikni oshirish va foydali komponentlarni samarali ajratib olish imkoniyatiga ega ekanligi ilmiy manbalarda qayd etilgan.

Foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish samaradorligini baholashda tahlil qilingan ilmiy manbalarda keltirilgan ajralib chiqish darajasi ko'rsatkichlaridan foydalanildi. Mazkur ishda alohida laboratoriya tajribalari o'tkazilmaganligi sababli ajralib chiqish darajasi mualliflar tomonidan mustaqil ravishda hisoblanmadi. Turli tadqiqotlarda ekologik xavfsiz va an'anaviy flotatsiya reagentlari qo'llanilganda olingan texnologik ko'rsatkichlar qiyosiy tahlil qilindi. Bunda reagent turi, mineral yoki ruda tarkibi, reagent sarfi, muhit pH qiymati, konsentrat sifati va foydali komponentning konsentratga ajralib chiqish darajasi kabi ko'rsatkichlarga alohida e'tibor qaratildi. Ushbu yondashuv ekologik xavfsiz reagentlarning texnologik samaradorligini mavjud ilmiy ma'lumotlar asosida baholash imkonini berdi.

Ilmiy manbalarda ekologik jihatdan istiqbolli reagentlarning sulfidli minerallar flotatsiyasidagi samaradorligi aniq texnologik ko'rsatkichlar asosida baholangan. Jumladan, tabiiy va biologik parchalanadigan polimer hisoblangan xitozan mis–molibden sulfidlarini selektiv ajratishda depressant sifatida tadqiq etilgan. Li va hammualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotda molibden saqlovchi mis sulfidli konsentratni flotatsion ajratishda pH 6 sharoitida xitozan qo'llanilganda molibdenning ko'pik mahsulotiga ajralib chiqishi 70% dan yuqori, misning ajralib chiqishi esa 24% dan past bo'lgan. Mualliflar buni xitozanning xalkopirit yuzasiga molibdenitga nisbatan kuchliroq adsorbsiyalanishi bilan izohlagan.

Xitozanning selektiv depressant sifatidagi ta'siri boshqa sulfidli mineral sistemalarida ham o'rganilgan. Xalkopirit–galenit aralashmasining flotatsiyasida pH 4 sharoitida xitozan qo'llanilganda galenitning ajralib chiqishi 95% gacha yetgan, xalkopiritning ajralib chiqishi esa taxminan 30% ni tashkil etgan. Murakkab sulfidli rudalarni flotatsiyalash bo'yicha boshqa tadqiqotda xitozanning 50–500 g/t miqdorlari sinovdan o'tkazilib, 50 g/t miqdorda uning piritni depressiyalash xususiyati an'anaviy NaCN depressanti bilan qiyoslangan. Ushbu natijalar tabiiy polimer asosidagi reagentlarning samaradorligi mineral tarkib, reagent miqdori va muhit pH qiymatiga sezilarli darajada bog'liq ekanligini ko'rsatadi.

Ekologik xavfsiz va an'anaviy reagentlarning asosiy texnologik hamda ekologik ko'rsatkichlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadvalda keltirilgan ma'lumotlar ekologik jihatdan istiqbolli reagentlarning texnologik samaradorligi mineral tarkib, reagent sarfi va muhit pH qiymatiga bog'liq ekanligini ko'rsatadi. Xususan, xitozanning Cu–Mo sulfidli konsentratni ajratishda selektiv depressant sifatida qo'llanilishi pH 6 sharoitida molibdenning ko'pik mahsulotiga 70% dan yuqori ajralib chiqishini ta'minlagan, misning ajralib chiqishi esa 24% dan past bo'lgan. Murakkab sulfidli rudalarda 50 g/t xitozan piritni depressiyalashda NaCN bilan qiyoslanadigan natijalarni ko'rsatgan. Ditiokarbamat-xitozan asosidagi modifikatsiyalangan reagent esa Cu–Zn sulfidlarini ajratishda pH 10 sharoitida 31,93% Cu saqlovchi boyitma va 85,97% Cu ajralib chiqish darajasini ta'minlagan. Ushbu natijalar tabiiy va modifikatsiyalangan biopolimerlardan sulfidli minerallar flotatsiyasida selektiv depressantlar sifatida foydalanish imkoniyati mavjudligini ko'rsatadi. Biroq ularning samaradorligini umumlashtirishda har bir mineral tizim uchun reagent sarfi, pH va mineralogik tarkib alohida hisobga olinishi lozim.

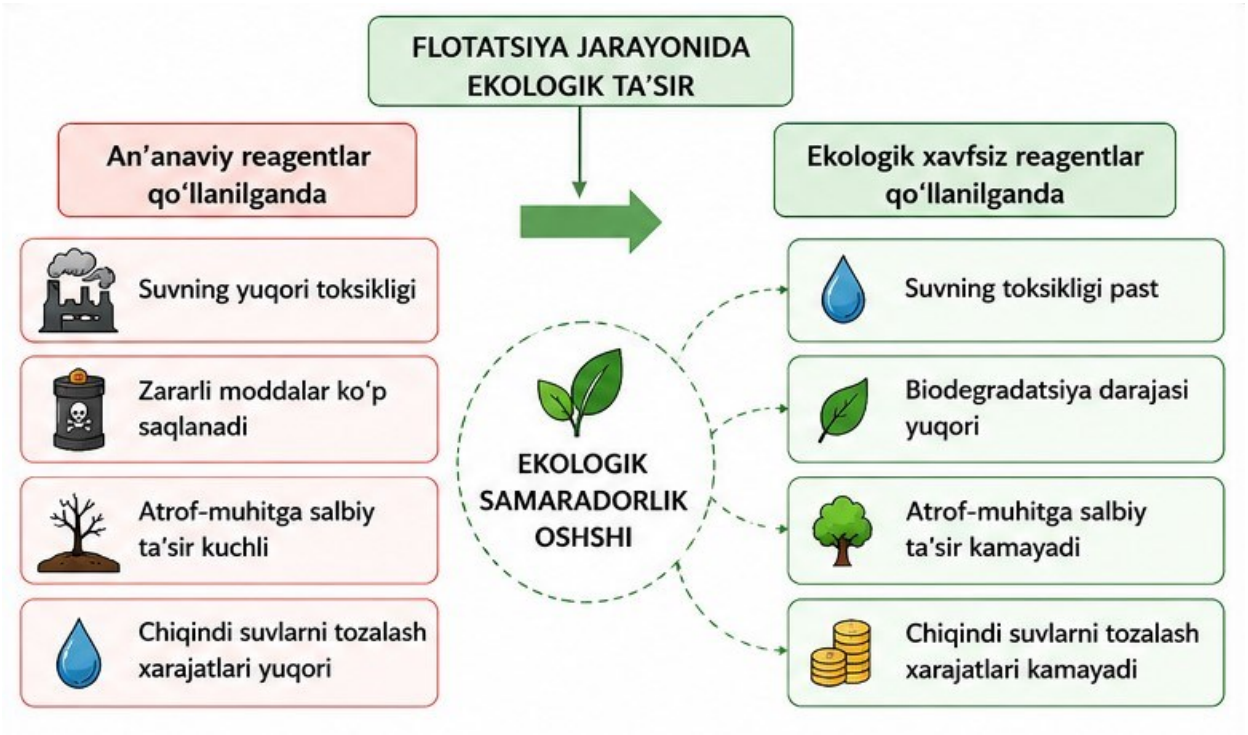
Ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanishning atrof-muhitga ta'siri 3-rasmda aks ettirilgan. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, bunday reagentlardan foydalanish natijasida chiqindi suvlarning toksiklik darajasi kamayadi, zararli moddalar emissiyasi pasayadi va suv resurslaridan samarali foydalanish imkoniyati ortadi.

3-rasmda ko'rsatilgan natijalarga ko'ra, ekologik xavfsiz reagentlar qo'llanilganda ishlab chiqarishning ekologik yuklamasi kamayadi, atrof-muhitga salbiy ta'sir pasayadi hamda korxonalarning ekologik samaradorligi oshadi. Natijada boyitish korxonalarida "yashil texnologiyalar"ni joriy etish uchun qulay sharoit yaratiladi.

1-jadval

Ekologik jihatdan istiqbolli reagentlarning sulfidli minerallar flotatsiyasidagi texnologik ko‘rsatkichlari

Reagent	Reagent vazifasi	Mineral/ruda	Sharoit	Asosiy natija	Manba
Xitozan (Chitosan)	Selektiv depressant	Molibdenit–xalkopirit, Cu–Mo sulfidli konsentrat	pH = 6	Mo ajralib chiqishi >70%; Cu ajralib chiqishi <24%	Li et al., 2015
Xitozan	Pirit depressanti	Galenit, xalkopirit, sfalerit va pirit saqlovchi murakkab sulfidli ruda	50 g/t	NaCN bilan solishtirganda pirit 5,6% ko‘proq depressiyalangan; konsentratdagi pirit miqdori ≈1,2% ga kamaygan	Hayat et al., 2017
DTC-CTS (ditiokarbamat-xitozan)	Sfalerit depressanti	Xalkopirit–sfalerit (Cu–Zn)	0,4 mg/L DTC-CTS; pH = 10; butil ksantat = 1×10^{-5} mol/L	Cu boyitmasi: 31,93% Cu; Cu ajralib chiqishi 85,97%; Zn 4,82%; Zn ajralib chiqishi 4,18%	Liu et al., 2021



3-rasm. Ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanishning atrof-muhitga ta’siri

Umuman olganda, o‘tkazilgan tahlillar sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish texnologik samaradorlikni saqlagan holda ekologik xavfsizlikni ta’minlashga xizmat qilishini ko‘rsatdi. Mazkur yo‘nalish kelajakda foydali qazilmalarni boyitish sanoatining ustuvor rivojlanish yo‘nalishlaridan biri bo‘lib qolishi kutilmoqda.

Natijalarni muhokama qilish

Olingan natijalar sulfidli rudalarni boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish zamonaviy boyitish texnologiyalarining muhim yo‘nalishlaridan biri ekanligini tasdiqlaydi. 1-rasmda keltirilgan texnologik sxema ekologik xavfsiz reagentlarni mavjud flotatsiya jarayonlariga integratsiya qilish imkoniyati mavjudligini ko‘rsatadi. Bu esa yangi texnologik liniyalarni qurmasdan turib, amaldagi boyitish fabrikalarida ekologik xavfsizlik darajasini oshirish imkonini beradi.

2-rasmda keltirilgan reagentlar tasnifi ekologik xavfsiz reagentlarning tarkibi va qo‘llanish sohalari keng ekanligini ko‘rsatadi. Ayniqsa, aminokislotalar asosidagi kollektorlar, tabiiy polimerlar va biomolekulalar asosidagi reagentlar selektiv flotatsiya jarayonlarida istiqbolli reagentlar sifatida qaralmoqda. Ularning asosiy afzalligi yuqori biodegradatsiya darajasi va past toksikligi bilan izohlanadi. Mazkur xususiyatlar ekologik xavfsizlik talablarining kuchayib borayotgan sharoitida muhim ahamiyat kasb etadi.

1-jadval ma’lumotlari ekologik xavfsiz reagentlarning an’anaviy reagentlarga nisbatan qator ustunliklarga ega ekanligini ko‘rsatadi. Xususan, ekologik xavfsiz reagentlar toksiklik va ekologik xavf ko‘rsatkichlari bo‘yicha sezilarli ustunlikka ega. Bundan tashqari, ularning selektivligi yuqori bo‘lib, foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish samaradorligini ta’minlaydi. Ayrim hollarda barqarorlik ko‘rsatkichlari an’anaviy reagentlarga nisbatan biroz past bo‘lishi mumkin, biroq bu holat ularning umumiy texnologik samaradorligini sezilarli darajada kamaytirmaydi. [5, 7].

3-rasmda aks ettirilgan ma'lumotlar ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish natijasida chiqindi suvlarning toksikligi kamayishini, zararli moddalar emissiyasi pasayishini va suv resurslaridan foydalanish samaradorligi oshishini ko‘rsatadi. Bu natijalar ekologik xavfsiz reagentlaming nafaqat texnologik, balki ekologik jihatdan ham samarali ekanligini tasdiqlaydi. Zamonaviy boyitish korxonalarida ekologik talablarning tobora kuchayib borayotganligi bunday reagentlarning amaliy ahamiyatini yanada oshirmoqda. [1, 4, 9].

Shuningdek, adabiyotlar tahlili ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish foydali komponentlarning ajralib chiqish ko‘rsatkichlarini saqlab qolish yoki yaxshilash imkoniyatiga ega ekanligini ko‘rsatdi. Bu esa ularni kelgusida sanoat miqyosida keng joriy etish uchun ilmiy asos mavjudligini bildiradi. Shu bilan birga, turli mineralogik tarkibga ega rudalar uchun optimal reagent rejimlarini ishlab chiqish hamda iqtisodiy samaradorlikni baholash bo‘yicha qo‘shimcha tadqiqotlar olib borish maqsadga muvofiqdir. [8, 9, 10].

Shuningdek, adabiyotlar tahlili ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish foydali komponentlarning ajralib chiqish ko‘rsatkichlarini saqlab qolish yoki ayrim hollarda yaxshilash imkoniyatiga ega ekanligini ko‘rsatdi [8–12]. Mahalliy tadqiqotchilar tomonidan mis-molibden va boshqa sulfidli rudalarni boyitish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar ham ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish istiqbolli yo‘nalish ekanligini tasdiqlaydi [10–12]. Shu bilan birga, turli mineralogik tarkibli rudalar uchun optimal reagent rejimlarini ishlab chiqish, reagent sarfini optimallashtirish hamda iqtisodiy samaradorlikni baholash bo‘yicha qo‘shimcha ilmiy izlanishlar olib borish zarur hisoblanadi.

Xulosa

O‘tkazilgan tadqiqotlar va ilmiy manbalar tahlili sulfidli rudalarni flotatsiya usulida boyitishda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanish zamonaviy boyitish texnologiyalarining istiqbolli yo‘nalishlaridan biri ekanligini ko‘rsatdi. Ekologik xavfsiz reagentlar an'anaviy flotatsiya reagentlariga nisbatan past toksiklik, yuqori biodegradatsiya darajasi va ekologik xavfning kamayishi kabi muhim afzalliklarga ega. [1, 5, 8].

Tahlil natijalari ekologik xavfsiz reagentlar foydali komponentlarning konsentratga ajralib chiqish samaradorligini saqlab qolishi, ayrim hollarda esa flotatsiya selektivligini yaxshilashi mumkinligini ko‘rsatdi. Bu esa boyitish korxonalarida texnologik ko‘rsatkichlarni pasaytirmagan holda ekologik xavfsizlikni ta'minlash imkonini beradi.

Aniqlanishicha, aminokislotalar asosidagi kollektorlar, tabiiy polimerlar va biomolekulalar asosidagi reagentlar sulfidli rudalarni boyitishda eng istiqbolli ekologik xavfsiz reagentlar qatoriga kiradi [10–12]. Ularning qo‘llanilishi chiqindi suvlarning toksikligini kamaytirish, zararli moddalar emissiyasini pasaytirish, suv resurslaridan samarali foydalanish hamda boyitish korxonalarining ekologik ko‘rsatkichlarini yaxshilash imkonini beradi. Mazkur reagentlar kelajakda kon-metallurgiya sanoatida ekologik xavfsiz va resurs tejamkor texnologiyalarni joriy etishning muhim omillaridan biri bo‘lishi mumkin.Tadqiqotning ilmiy ahamiyati ekologik xavfsiz reagentlarning texnologik va ekologik afzalliklarini tizimli ravishda umumlashtirish hamda ularni boyitish korxonalarida qo‘llashning istiqbolli yo‘nalishlarini asoslash bilan belgilanadi. Amaliy jihatdan esa olingan natijalar kon-metallurgiya sanoatida zamonaviy "yashil texnologiyalar"ni joriy etish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin. [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Kelgusida ekologik xavfsiz reagentlarning turli mineralogik tarkibli rudalar uchun samaradorligini laboratoriya va sanoat sharoitlarida chuqurroq o‘rganish, optimal reagent rejimlarini ishlab chiqish hamda ularning iqtisodiy samaradorligini baholash maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Minnatdorchilik. Mualliflar mazkur tadqiqotni amalga oshirish va maqolani tayyorlash jarayonida ko‘rsatgan ilmiy-uslubiy tavsiyalari hamda qimmatli maslahatlari uchun Olmaliq davlat texnika instituti "Konchilik" fakulteti professor-o‘qituvchilariga o‘z minnatdorchiliklarini bildiradilar. Shuningdek, foydali qazilmalarni boyitish texnologiyalarini takomillashtirish bo‘yicha olib borilgan ilmiy izlanishlar davomida yaratilgan ilmiy muhit va ko‘rsatilgan ko‘mak uchun institut jamoasiga samimiy tashakkur izhor etadilar.

Bibliografik ro'yxati:

1.Ahmed, H. A. (2024). Eco-friendly reagents for sustainable flotation processes. Journal of Cleaner Production, 412, Article 138745.
2.Bulatovic, S. M. (2018). Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice. Elsevier.
3.Fuerstenau, D. W. (2020). Flotation science and engineering. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
4.Pradip, K. (2022). Green technologies in mineral beneficiation. Minerals, 12(8), 965.
5.Rao, S. R. (2021). Surface chemistry of froth flotation. Springer.
6.Wills, B. A., & Finch, J. (2019). Mineral processing technology (9th ed.). Butterworth-Heinemann.
7.Xu, M., & Liu, Q. (2023). Environmentally friendly reagents in sulfide ore flotation. International Journal of Mineral Processing, 228, Article 106987.
8.Zhang, Y., Wang, X., & Li, H. (2022). Application of biodegradable collectors in sulfide mineral flotation. Minerals Engineering, 185, Article 107693.
9.Liu, J., Chen, Z., & Zhao, Y. (2023). Sustainable flotation technologies for mineral beneficiation. Separation and Purification Technology, 310, Article 123135.
10.Ahmedov, A. A., & Turaev, B. S. (2022). Investigation of copper-molybdenum ore beneficiation technology in Uzbekistan. International Journal of Mining Science, 11(2), 88–96.
11.Хасанов, М. М. (2023). Минералогические и технологические особенности медно-молибденовых руд Алмалыкского региона. Узбекский геологический журнал, (1), 61–69.
12.Каримов, У. К., & Рахимов, Ш. А. (2021). Исследование флотационных свойств молибденита месторождения Калмакыр. Вестник ТГТУ, (2), 52–58.



Хасанов Адхам Аманкулович – декан факультета «Горное дело и металлургия», Алмалыкский государственный технический институт, доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент
E-mail: adhamhasanov122@gmail.com
ORCID: 0009-0001-9946-7123

Adham Amankulovich Khasanov – Dean of the Faculty of Mining and Metallurgy, Almalyk State Technical Institute, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: adhamhasanov122@gmail.com
ORCID: 0009-0001-9946-7123

Xasanov Adham Amankulovich – "Konchilik va metallurgiya" fakulteti dekani, Olmaliq davlat texnika instituti, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: adhamhasanov122@gmail.com
ORCID: 0009-0001-9946-7123



Хожимуратова Хилола Баходировна – базовый докторант кафедры «Горное дело», Алмалыкский государственный технический институт
E-mail: xilolaxojimurotova@gmail.com
ORCID: 0009-0005-6907-7297

Khilola Bakhodirovna Khojimuratova – Doctoral Student of the Department of Mining Engineering, Almalyk State Technical Institute
E-mail: xilolaxojimurotova@gmail.com
ORCID: 0009-0005-6907-7297

Xojimuratova Xilola Baxodirovna – "Konchilik ishi" kafedrasi tayanch doktoranti, Olmaliq davlat texnika instituti
E-mail: xilolaxojimurotova@gmail.com
ORCID: 0009-0005-6907-7297

НФ-630; НФ-1200М-03
ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ФРЕЗЕРНО-РАСТОЧНОЙ СТАНОК



NMZ

АО «НГМК»
Производственное объединение
«Навоийский машиностроительный завод»
www.ngmk.uz
Адрес: г. Навои, ул. Инспекторов, 5
Тел.: (+99879) 2276214; 227-64-23
Факс: (+99879) 223-48-78
E-mail: informz@ngmk.uz

УДК 621.314 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПУЗЫРЬКОВОЙ АЭРАЦИИ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УРАНА

Файзуллаев Дж.С., Сапаров А.Б., Рузиев О.Б., Бозоров Ф.А., Рузиев Б.Т.

ГП «Навоийуран», Республика Узбекистан

Аннотация. *Целью исследования является теоретический анализ возможностей применения микропузырьковой технологии для повышения эффективности процессов подземного выщелачивания (In-Situ Leaching, ISL) урана. Работа направлена на изучение влияния микропузырьков на растворение кислорода, массоперенос и редокс-кинетику в системе «уран-кислород-пластовая вода», а также на оценку потенциала микропузырьковой аэрации для оптимизации извлечения урана. Методология исследования включала комплексный литературный анализ, моделирование процессов массопереноса, анализ физико-химических характеристик микропузырьков, включая размер, удельную поверхность, устойчивость в жидкой фазе и способность поддерживать стабильность границы раздела газ-жидкость. Дополнительно рассматривались механизмы образования активных форм кислорода при имплозии микропузырьков (OH, O_2, HO_2, H_2O) и их влияние на кинетику окисления урановых минералов. Внимание уделялось способам генерации микропузырьков, включая кавитационные, мембранные, электрохимические и вихревые генераторы, а также сравнительной оценке их эффективности и применимости в условиях подземного выщелачивания. Основные результаты показали, что микропузырьки обеспечивают равномерное распределение окислителя по продуктивному горизонту, стабилизируют окислительно-восстановительный потенциал (Eh), ускоряют переход урана из U(IV) в растворимую форму U(VI) и усиливают редокс-процессы за счет генерации активных форм кислорода. Новизна работы заключается в комплексном рассмотрении микропузырьковой аэрации как инновационного инструмента, позволяющего одновременно повысить кислородную доступность, ускорить редокс-кинетику и оптимизировать извлечение урана в условиях подземного выщелачивания. Практическая значимость проявляется в возможности повышения коэффициента извлечения урана, снижения расхода окислителя, сокращения времени выщелачивания и адаптации технологии к конкретным геотехнологическим условиям.*

Ключевые слова: *подземное выщелачивание, микропузырьки, генераторы микропузырьков, аэрация, окисление, уран, массоперенос, Eh-потенциал.*

URANNI YER OSTIDA TANLAB ERITISHDA MIKROPUFAGCHALI AERATSIYANI QO‘LLASHNING NAZARIY ASOSLARI VA ISTIQBOLLARI

J.S. Fayzullayev, A.B. Saparov, O.B. Ruziyev, F.A. Bozorov, B.T. Ruziyev

“Navoiyuran” DK, O‘zbekiston Respublikasi

Annotasiya. *Tadqiqotning maqsadi mikropufakchali texnologiyani yer osti tanlab eritish jarayonlarida ularning samaradorligini oshirish imkoniyatlarini nazariy tahlil qilishdir. Mikropufakchalar kislorodning erishi, massa almashinuvi va redoks-kinetikasiga “uran-kislorod-qatlam suvi” tizimida ta’sirini o‘rganishga, shuningdek, mikropufakchali aeratsiyaning uran ajratish samaradorligini optimallashtirish potensialini baholashga qaratilgan. Tadqiqotda kompleks adabiyot tahlili, massa almashinuvi jarayonlarini modellashtirish, mikropufakchalarning fizik-kimyoviy xususiyatlarini, jumladan, o‘lcham, yuzasi, suyuq fazada barqarorligi va gaz-suyuqlik chegarasining barqarorligini ta’minlash qobiliyati tahlil qilindi. Bundan tashqari, mikropufakchalarning imploziyasi natijasida hosil bo‘ladigan faol kislorod shakllari (OH, O_2, HO_2, H_2O_2) va ularning uran minerallarini oksidlanish kinetikasiga ta’siri o‘rganildi. E’tibor mikropufakchalarni hosil qilish usullariga ham qaratildi, jumladan, kavitatsion, membranali, elektrokimyoviy mikropufakcha generatorlari shuningdek ularning samaradorligi va yer osti ishqorlash sharoitida qo‘llanilishining solishtirma tahlili o‘tkazildi. Asosiy natijalar shuni ko‘rsatdiki, mikropufakchalar oksidlovchini mahsuldor qatlam bo‘ylab teng taqsimlashni ta’minlaydi, redoks-potensialni (Eh) barqarorlashtiradi, uranni U (IV) dan eruvchan U(VI) shakliga o‘tishini tezlashtiradi va faol kislorod shakllari orqali redoks jarayonlarni kuchaytiradi. Yangi jihat shundaki, mikropufakchali aeratsiya innovatsion vosita sifatida kislorod ta’minotini yaxshilash, redoks-kinetikani tezlashtirish va yer osti ishqorlash sharoitida uran ajratishni optimallashtirish imkonini beradi. Amaliy ahamiyat shundaki, bu yondashuv uran ajratish koeffitsientini oshirish, oksidlovchi sarfini kamaytirish, ishqorlash vaqtini qisqartirish va texnologiyani aniq geotexnologik sharoitlarga moslashtirish imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *yer osti ishlorlashtirish, mikropufakchalar, mikropufakcha generatorlari, aeratsiya, oksidlanish, uran, massa almashinuvi, Eh-potensial.*

THEORETICAL BACKGROUND AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF MICRO-BUBBLE AERATION IN THE IN-SITU LEACHING OF URANIUM

J.S. Fayzullayev, A.B. Saparov, O.B. Ruziyev, F.A. Bozorov, B.T. Ruziyev

"Navoiyuran" State Enterprise, Republic of Uzbekistan

Abstract. *The aim of this study is to provide a theoretical analysis of the potential application of microbubble technology to enhance the efficiency of uranium in-situ leaching (ISL) processes. The work focuses on investigating the influence of microbubbles on oxygen dissolution, mass transfer, and redox kinetics in the "uranium–oxygen–formation water" system, as well as on assessing the potential of microbubble aeration for modeling, and analysis of the physicochemical characteristics of microbubbles, including their size, specific surface area, stability in the liquid phase, and ability to maintain a stable gas–liquid interface. In addition, the mechanisms of reactive oxygen species formation during microbubble implosion (OH, O_2, HO_2, H_2O_2) and their effects on the oxidation kinetics of uranium minerals are examined. Consideration is also given to microbubble generation methods, including cavitation, membrane, electrochemical, and vortex generators, along with a comparative assessment of their efficiency and applicability under in-situ leaching conditions.*

The main results demonstrate that microbubbles ensure uniform distribution of the oxidant throughout the productive horizon, stabilize the redox potential (Eh), accelerate the conversion of uranium from U(IV) to the soluble U(VI) form, and intensify redox processes due to the generation of reactive oxygen species. The novelty of this work lies in the comprehensive consideration of microbubble aeration as an innovative tool capable of simultaneously increasing oxygen availability, accelerating redox kinetics, and optimizing uranium recovery under in-situ leaching conditions. The practical significance of the study is reflected in the potential to increase uranium recovery rates, reduce oxidant consumption, shorten leaching time, and adapt the technology to specific geotechnological conditions.

Keywords: *in-situ leaching, microbubbles, microbubble generators, aeration, oxidation, uranium, mass transfer, Eh potential.*

Подземное выщелачивание (ПВ, ISL - *In Situ Leaching*) урана в настоящее время является основным промышленным методом извлечения урана из песчаниковых, рыхлых и слабосцементированных пород. По обобщённым оценкам, на долю данного способа приходится до 60-70 % мировой добычи урана, что обусловлено как геологическими предпосылками, так и существенными технологическими и экономическими преимуществами метода. Примечательно, что на песчаниковые урановые месторождения приходится приблизительно 37,5% мировых урановых месторождений, что составляет около 28% мировых ресурсов урана [1].

В отличие от открытых и подземных горных работ, ПВ характеризуется сравнительно низкими капитальными затратами, отсутствием необходимости вскрышных и очистных работ, минимальным нарушением земной поверхности и сниженной экологической нагрузкой, что делает данный метод приоритетным при освоении урановых месторождений, залегающих на значительных глубинах и в сложных природных условиях [2].

Сущность процесса подземного выщелачивания заключается в циркуляции выщелачивающих растворов непосредственно в пределах продуктивного пласта. Через систему нагнетательных скважин рабочий раствор подаётся в фильтрующий горизонт, где он взаимодействует с урановой и вмещающими породами. В результате протекающих химических реакций уран переходит из твёрдой минеральной формы в растворённое состояние. Образующийся продуктивный раствор откачивается через добычные скважины и направляется на поверхность для дальнейшей переработки [3]. Эффективность данного процесса определяется совокупностью гидродинамических, геохимических и физико-химических факторов, действующих в системе «пласт - раствор».

Одним из определяющих факторов эффективности подземного выщелачивания является окислительно-восстановительное состояние системы «уран-пластовая вода-окислитель». В природных условиях уран преимущественно присутствует в форме четырёхвалентных соединений U(IV), обладающих крайне низкой растворимостью в водных растворах. Для обеспечения его перехода в подвижную форму необходимо окисление до шестивалентного состояния U(VI), в котором уран образует устойчивые и хорошо растворимые комплексы [4]. Поддержание повышенного окислительно-восстановительного потенциала раствора (Eh) является обязательным условием устойчивого протекания реакций окисления и определяет кинетику растворения урановой минерализации.

Промышленный опыт показывает, что в реальных условиях продуктивного пласта поддержание требуемого уровня Eh сопряжено с рядом технологических трудностей. Измеряемые значения окислительно-восстановительного потенциала, как правило, находятся в диапазоне порядка +300…+400 мВ, что во многих случаях оказывается недостаточным для стабильного и равномерного окисления U(IV). Особенно выражено это в пластах с высокой восстановительной способностью, обусловленной присутствием двухвалентного железа, сернистых соединений, органического вещества и других восстановленных компонентов, активно потребляющих окислитель. В результате формируются локальные восстановительные зоны, в которых скорость окисления урана существенно снижается, а процесс выщелачивания становится неравномерным и менее управляемым.

В качестве окислителя в технологических схемах подземного выщелачивания традиционно применяют атмосферный воздух или технический кислород, подаваемые в поток раствора с использованием эжекционных или компрессорных устройств.

При этом в жидкой фазе образуются газовые пузырьки миллиметрового размера, для которых характерны высокая скорость всплытия, малое время контакта с раствором и ограниченная площадь межфазного взаимодействия. Это приводит к низкой степени растворения кислорода и снижению коэффициента его использования. Значительная часть подаваемого окислителя удаляется из системы в газовой фазе, не принимая участия в окислительных реакциях, что подтверждается промышленными наблюдениями.

Неравномерное распределение кислорода в фильтрующем горизонте обусловливает пространственную неоднородность окислительно-восстановительных условий, колебания Eh и формирование зон с пониженной окислительной способностью раствора. Это отрицательно влияет на кинетику окисления урана, снижает

полноту его извлечения и приводит к увеличению удельного расхода окислителя. Указанные обстоятельства подчёркивают необходимость совершенствования методов подачи кислорода и повышения эффективности его использования в процессах подземного выщелачивания.

С термодинамической точки зрения повышение давления в системе способствует увеличению растворимости кислорода в воде. В условиях подземного выщелачивания давление пластовых вод может достигать десятков атмосфер, что создаёт потенциально благоприятные условия для насыщения раствора кислородом. Согласно закону Генри, при постоянной температуре растворимость газа пропорциональна его парциальному давлению.

$$C = k_H \cdot P_{O_2} \quad (1)$$

где, k_H – константа Генри, зависящая от температуры, P_{O_2} – парциальное давление кислорода, атм.

Из данного соотношения следует, что увеличение давления в системе должно приводить к пропорциональному росту концентрации растворённого кислорода. Экспериментальные данные действительно подтверждают существенное повышение растворимости кислорода при увеличении давления, что теоретически создаёт благоприятные условия для интенсификации окислительных процессов в условиях подземного выщелачивания. Однако в реальных пластовых системах данный эффект реализуется не полностью. Высокая минерализация растворов, характерная для пластовых вод урановых месторождений, а также повышенная температура приводят к снижению растворимости кислорода. По экспериментальным оценкам, растворимость кислорода снижается на 40 и более %, что ограничивает эффективность традиционных методов аэрации даже при повышенном давлении.

Дополнительным фактором, снижающим эффективность насыщения раствора кислородом, является кинетическое ограничение процессов массопереноса в системах с крупными газовыми пузырьками. Даже при повышенном парциальном давлении кислорода значительная часть газа не успевает перейти в растворённое состояние из-за быстрого всплытия пузырьков и недостаточного времени контакта с жидкой фазой. В результате реальная концентрация растворённого кислорода в растворе оказывается существенно ниже термодинамически возможной, что определяет необходимость поиска технологических решений, направленных на интенсификацию растворения кислорода и его равномерное распределение в продуктивном пласте.

В этом контексте особый интерес представляет микропузырьковая технология аэрации, которая в последние годы получает широкое развитие и практическое применение в различных отраслях промышленности. В отличие от традиционной эжекционной аэрации, данная технология основана на формировании газовых пузырьков микронного диапазона размеров [5]. В гидрометаллургии микропузырьковая аэрация применяется для ускорения окислительных реакций при выщелачивании и очистке растворов, в том числе для окисления и стабилизации окислительно-восстановительного режима [6]. В системах водоочистки технология используется для флотации и окисления загрязнителей, демонстрируя высокую эффективность при удалении органических веществ и ионов металлов [7]. В биотехнологии микропузырьки позволяют поддерживать стабильную концентрацию растворённого кислорода в биореакторах при сниженных энергозатратах, а в нефтедобыче применяются для интенсификации массообменных процессов и повышения эффективности вытеснения нефти.

Таким образом, опыт практического использования микропузырьковой аэрации в различных областях подтверждает её высокий потенциал как универсального инструмента интенсификации газожидкостного массопереноса, что создаёт предпосылки для её применения в процессах подземного выщелачивания урана.

Эффективность микропузырьковой аэрации в газожидкостных системах определяется прежде всего малыми размерами пузырьков, что приводит к существенному увеличению удельной поверхности межфазного контакта и резкому снижению скорости всплытия газовой фазы. Для микропузырьков диаметром порядка 10-50 мкм удельная поверхность межфазного контакта может достигать 500-1000 см^2/см^3, тогда как для пузырьков миллиметрового диапазона этот показатель, как правило, не превышает 5-10 см^2/см^3. Таким образом, уменьшение характерного диаметра пузырька на два порядка сопровождается увеличением удельной поверхности контакта также на два порядка, что принципиально усиливает процессы растворения кислорода в жидкости.

Резкое возрастание межфазной поверхности обеспечивает более интенсивное и пространственное равномерное насыщение раствора кислородом даже при относительно низком расходе окислителя, что имеет особое значение для технологических процессов, протекающих в пористых средах и фильтрующих горизонтах, включая подземное выщелачивание урана.

С позиций диффузионной кинетики перенос кислорода через границу газ–жидкость может быть описан первым законом Фика:

$$J = -D\frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

где, J – плотность диффузионного потока, моль/(м^2·с), D – коэффициент диффузии, $\frac{dc}{dx}$ – градиент концентрации.

В микропузырьковой системе увеличение суммарной площади межфазного контакта приводит к росту интегрального диффузионного потока кислорода даже при неизменном градиенте концентрации. Это обеспечивает более полное усвоение подаваемого кислорода жидкой фазой и способствует поддержанию повышенного и более однородного окислительно-восстановительного потенциала в объёме фильтрующего горизонта, что является ключевым фактором устойчивого протекания окислительных стадий подземного выщелачивания.

Стабильность газовых пузырьков в воде определяется взаимодействием жидкой и газовой фаз на границе их раздела. Ключевую роль в этом процессе играет поверхностное натяжение, которое формирует избыточное внутреннее давление внутри пузырька и тем самым интенсифицирует растворение газа в жидкости.

В соответствии с уравнением Лапласа избыточное давление ΔP внутри пузырька обратно пропорционально его радиусу r и описывается выражением. Следовательно, меньший радиус пузырька соответствует более высокому внутреннему давлению [8].

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r} \quad (3)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; r – радиус пузырька, м.

давление составляет около 12–15 кПа, что существенно превышает аналогичный показатель для крупных пузырьков. Такая величина давления является достаточной для ускоренного растворения газа и повышения локальной концентрации кислорода в приповерхностном слое жидкости, но при этом не приводит к мгновенному разрушению или нестабильности пузырьков.

Под действием сил поверхностного натяжения размеры микропузырьков постепенно уменьшаются, что сопровождается ростом

внутреннего давления и дополнительным ускорением процесса растворения газа. В результате в системе достигается более высокая концентрация растворённого газа по сравнению с традиционными методами аэрации с использованием макропузырьков. Таким образом, микропузырьковая аэрация обеспечивает длительную стабильность пузырьков, эффективный перенос кислорода в жидкую фазу и интенсификацию окислительных процессов.

Дополнительную устойчивость микропузырьков обеспечивает формирование на их поверхности электрического двойного слоя (Рис.1) [9]. В результате адсорбции ионов на границе газ-жидкость пузырьки приобретают положительный или отрицательный заряд, что препятствует их коалесценции (слипанию) за счёт электростатического отталкивания между пузырьками. Электростатическое отталкивание между пузырьками обеспечивает их длительное существование в растворе и способствует равномерному распределению кислорода по объёму жидкости и фильтрующему горизонту. Данный эффект имеет принципиальное значение для процессов подземного выщелачивания урана, поскольку позволяет снизить пространственную неоднородность окислительно-восстановительных условий и обеспечить более стабильное протекание реакций окисления урановой минерализации.

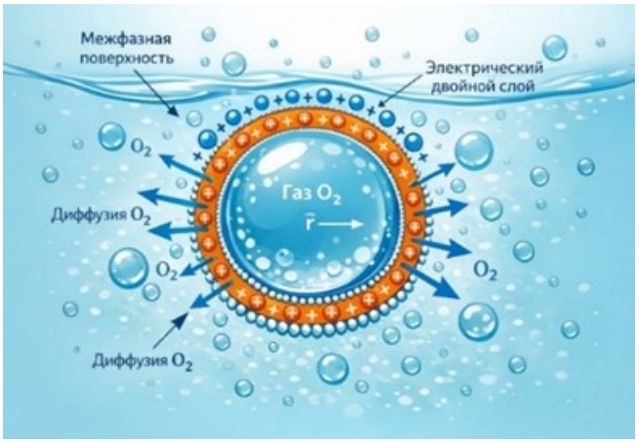


Рис. 1. Схема микропузырька в жидкости с формированием электрического двойного слоя на границе газ–жидкость и направлением диффузии кислорода в раствор.

При разрушении (имплозии) микропузырьков в водной среде вблизи их поверхности формируются кратковременные локальные зоны с экстремальными физическими параметрами, характеризующиеся резко повышенными температурами (до нескольких тысяч кельвинов) и давлениями, достигающими сотен атмосфер (рис. 2). Несмотря на крайне малую продолжительность существования, данные микрозоны обладают высокой энергетической плотностью, достаточной для инициирования неравновесных химических процессов, принципиально отличающихся от реакций, протекающих в объёме раствора при обычных термодинамических условиях.

Формирование таких высокоэнергетических областей связывают с быстрым сжатием газовой фазы и коллапсом границы газ-жидкость, сопровождающимся локальным нарушением структуры водородных связей в воде. В этих условиях происходит интенсификация электронно-радикальных процессов, приводящих к образованию активных форм кислорода (АФК), обладающих высокой реакционной способностью.

К числу основных АФК, формирующихся в микропузырьковой среде, относятся гидроксильные радикалы (•OH), супероксид-радикал-анионы ($O_2^{\bullet -}$), гидропероксильные радикалы (HO_2•), а также перекись водорода (H_2O_2) [10]. Упрощённая схема их образования может быть представлена следующей последовательностью реакций:

$$O_2 + e^- \rightarrow O_2^- \quad (4)$$

$$O_2^- + H^+ \rightarrow HO_2 \quad (5)$$

$$H_2O \rightarrow H + OH \quad (6)$$

$$2 \cdot OH \rightarrow H_2O_2 \quad (7)$$

Следует отметить, что приведённая схема носит обобщённый характер и отражает лишь основные направления радикальных превращений. В реальных системах возможны более сложные цепные реакции с участием промежуточных активных частиц, а также взаимодействие АФК с ионами металлов, минеральной матрицей и органическими компонентами пластовой среды.

Сформированные активные формы кислорода обладают значительно более высоким окислительным потенциалом по сравнению с молекулярным кислородом. В частности, гидроксильный радикал относится к числу наиболее сильных окислителей в водных системах и способен инициировать окисление труднорастворимых соединений урана. Перекись водорода, являясь более стабильным окислителем, может мигрировать в объёме раствора и участвовать в реакциях окисления U(IV) даже на некотором рас-

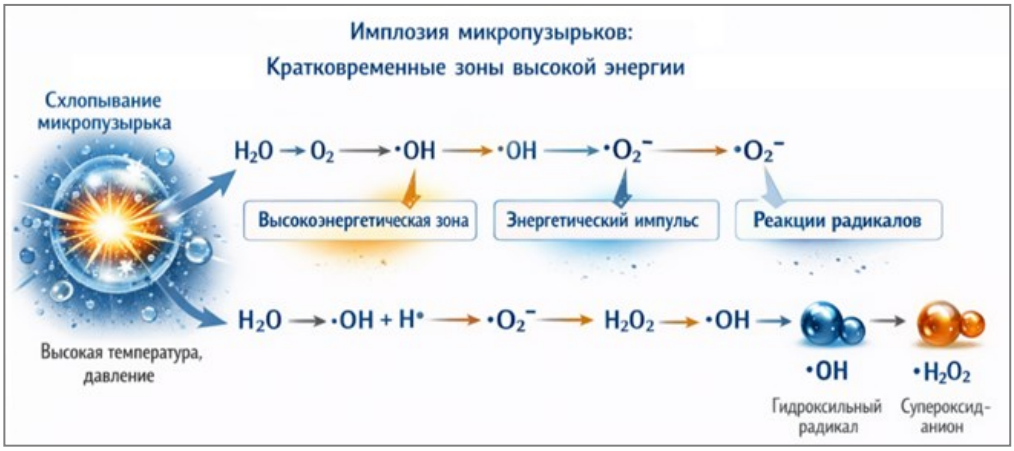


Рис. 2. Схема радикальных реакций и образования активных форм кислорода при имплозии микропузырьков

В условиях подземного выщелачивания урана данные активные окислители теоретически способны способствовать ускоренному превращению четырёхвалентного урана в шестивалентное состояние. В частности, реакция окисления U(IV) перекисью водорода может быть описана упрощённым уравнением:

$$U_4^{+} + H_2O_2 \rightarrow UO_2^{2+} + 2H^{+} \quad (8)$$

что приводит к образованию подвижного уранил-иона, легко образующего растворимые комплексы в растворах.

В восстановленных зонах урановых руд значительная часть железа находится в двухвалентной форме (Fe^{2+}), связанной с минеральной матрицей продуктивного пласта. Такие зоны характеризуются пониженным окислительно-восстановительным потенциалом и обычно содержат уран преимущественно в четырёхвалентном состоянии, обладающем низкой растворимостью.

В условиях традиционного подземного выщелачивания окисление этих участков может протекать медленно из-за ограниченной растворимости кислорода и его неравномерного распределения в фильтрующем горизонте. Теоретически применение микропузырьковой аэрации может способствовать более эффективному окислению Fe^{2+} за счёт увеличения концентрации растворённого кислорода и времени контакта газовой и жидкой фаз. В таких условиях предполагается протекание реакций окисления Fe^{2+} молекулярным кислородом:

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^{+} \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O. \quad (9)$$

Кроме того, имплозия микропузырьков может стимулировать образование активных форм кислорода, включая гидроксильные радикалы (•OH). Эти радикалы формируются, в частности, через каталитическое разложение пероксида водорода в присутствии Fe^{2+}, что соответствует классической реакции Фентона:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH + OH^{-} \quad (10)$$

Таким образом, система Fe^{2+}/Fe^{3+} может рассматриваться как механизм редокс-цикла, обеспечивающего циркуляцию окислительно-восстановительного потенциала в растворе. Микропузырьковая аэрация теоретически поддерживает этот цикл за счёт увеличенной концентрации растворённого кислорода и генерации активных окислителей, что может способствовать переносу окислительного потенциала вглубь восстановленных зон пласта и облегчать окисление устойчивых восстановительных компонентов, замедляющих переход урана в растворимую форму.

Протекание подобных реакций в микропузырьковой среде теоретически способно компенсировать локальные дефициты растворённого кислорода и способствовать повышению устойчивости окислительного режима в пределах фильтрующего горизонта (Рис.3). Формирование активных форм кислорода и их возможное участие в окислительных превращениях следует рассматривать как дополнительный механизм, усиливающий действие молекулярного кислорода и расширяющий диапазон условий, при которых может осуществляться эффективное окисление урановой минерализации.

Снижение проницаемости продуктивного пласта при подземном выщелачивании урана обычно связано с образованием вторичных осадков гипса и соединений железа в зонах резких изменений окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Неравномерное распределение растворённого кислорода в фильтрующем горизонте приводит к локализации окислительных процессов и образованию отдельных участков интенсивного осадкообразования. С точки зрения процессов массопереноса и окислительной кинетики можно предположить, что более равномерное поступление кислорода и сглаживание Eh по объёму пласта способствует снижению интенсивности вторичного осадкообразования, что может привести к сохранению фильтрационных свойств и проницаемости продуктивного горизонта.

Методы получения микропузырьков можно классифицировать на физические и химические методы в зависимости от характера их образования [11]. Для получения микропузырьков применяются различные типы генераторов - кавитационные, мембранные, электрохимические и вихревые (табл. 1). Выбор конкретного типа определяется составом технологического раствора, рабочим давлением и требуемой производительностью, поскольку каждый метод обладает своими особенностями и преимуществами.

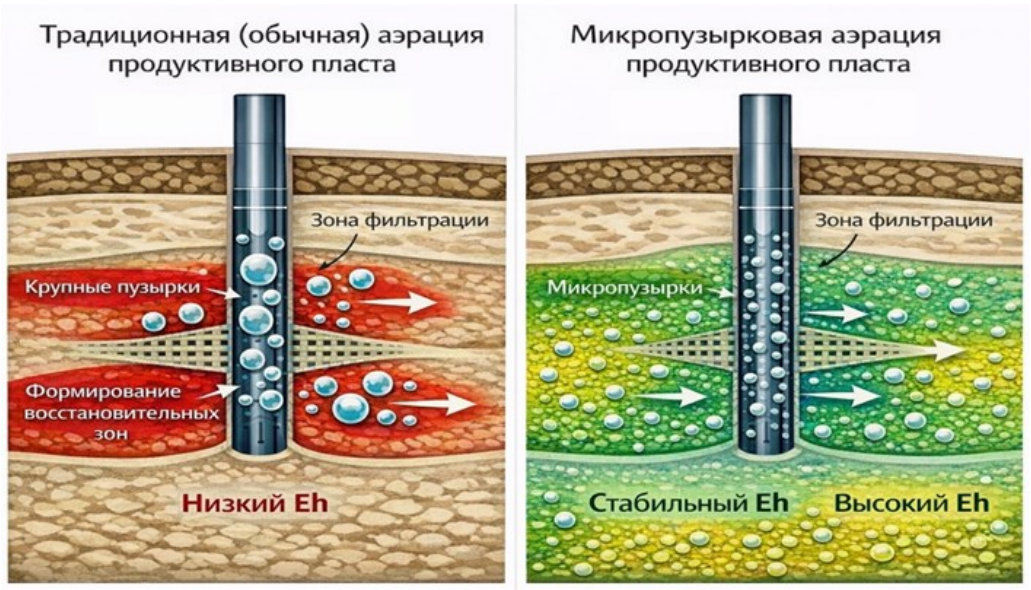


Рис. 3. Сравнительная схема традиционной и микропузырьковой аэрации продуктивного пласта

Таблица 1

Сравнительная характеристика генераторов микропузырьков

Тип генератора	Принцип действия	Размер пузырьков, мкм	Энергопотребление, кВт·ч/м³	Особенности
Кавитационный	Гидродинамическая кавитация в потоке	20–80	0,5–0,8	Простая конструкция, отсутствие подвижных частей, ограниченный контроль размера
Мембранный	Просачивание газа через микропоры	5–20	0,3–0,5	Равномерное распределение, требуется очистка мембраны
Электрохимический	Электролиз воды с выделением O_2	10–30	0,4–0,7	Генерация пузырьков в потоке, высокая чистота кислорода
Вихревой	Вращательное диспергирование потока	10–50	0,6–0,9	Интенсивное перемешивание, повышенное энергопотребление

Наиболее перспективными для систем подземного выщелачивания являются мембранные и кавитационные генераторы, обеспечивающие высокую степень растворения кислорода при умеренном энергопотреблении.

Для внедрения микропузырьковой технологии в схемы ПВ необходимо обеспечить подачу газожидкостной смеси в пласт без потери микродисперсной структуры пузырьков. Существует два основных подхода:

1. Формирование микропузырьков на поверхности, перед подачей раствора в нагнетательную систему. Газ вводится через генератор, установленный на линии подачи. При транспортировке возможна коалесценция пузырьков, что требует применения стабилизаторов или гидродинамических вставок.

2. Генерация микропузырьков непосредственно в префильтровой зоне скважины. В этом случае газ подаётся под давлением в поток раствора, проходящий через кавитационные или мембранные элементы, что обеспечивает формирование микропузырьков прямо в зоне фильтра и равномерное распределение кислорода в пласте.

При выборе генераторов для ПВ необходимо учитывать минерализацию технологических растворов, содержание механических примесей и риск заиливания фильтров.

Применение микропузырьковой аэрации в системах подземного выщелачивания урана представляет собой перспективное направление, способное повысить эффективность процесса за счёт комплекса взаимосвязанных физико-химических и гидродинамических факторов. В первую очередь, использование микропузырьков обеспечит увеличение степени растворения кислорода в рабочем растворе за счёт роста удельной межфазной поверхности и увеличения времени удержания пузырьков в жидкости. Такая особенность создаёт условия для более полного усвоения кислорода раствором и приближения фактической концентрации растворённого кислорода к термодинамически возможным значениям, что особенно актуально в условиях высокой минерализации пластовых вод.

Равномерное распределение микропузырьков в объёме продуктивного пласта может способствовать стабилизации окислительно-восстановительного потенциала раствора на повышенном уровне, как правило в диапазоне +550…+600 мВ, что является благоприятным для ускоренного перехода труднорастворимого U(IV) в подвижную шестивалентную форму U(VI). Поддержание стабильного Eh уменьшает влияние локальных восстановительных барьеров, повышает кинетическую однородность процесса выщелачивания и, как следствие, способствует росту коэффициента извлечения урана.

Дополнительным эффектом микропузырьковой аэрации является рационализация расхода окислителя: повышение коэффициента усвоения кислорода уменьшает потери газа с фазой и снижает вероятность формирования восстановительных зон в фильтрующем горизонте, что благоприятно отражается на геохимической стабильности продуктивного пласта.

Таким образом, проведённый теоретический анализ подтверждает целесообразность внедрения микропузырьковой технологии как инструмента интенсификации процессов массопереноса и усиления окислительных реакций в подземном выщелачивании урана. Рассмотренные физико-химические предпосылки свидетельствуют о возможности повышения степени растворения кислорода, стабилизации Eh и улучшения кинетики извлечения урана. Для практической реализации указанных преимуществ необходимы экспериментальные исследования, включающие лабораторные и полупромышленные испытания, а также разработку инженерных решений, адаптированных к геолого-технологическим условиям конкретных урановых месторождений.

Библиографический список:

1. Международное агентство по атомной энергии. Мировое распределение месторождений урана (UDEPO) с классификацией месторождений урана. - Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2009. - 200 с.

2. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана. - Москва: Атомиздат, 1978. - 326 с.

3. Абзалов, М.З. Урановые месторождения в песчаниках, пригодные для разработки с использованием технологий подземного выщелачивания // Прикладные науки о Земле. - 2013. - № 121. - С. 55-64.

4. Бровин, К.Г.; Грабовников В.А.; Шумилин, М.В.; Языков В.Г. Прогноз, поиск, разведка и промышленная оценка месторождений урана для добычи методом подземного выщелачивания. - Алматы: Гылым, 1997. - 384 с.

5. Руби, К.; Маджумдер, С.К. Исследования стабильности и свойств ионных микропузырьков, содержащих микро- и наночастицы // Powder Technol. - 2018. - Vol. 335. - P. 77-90.

6. Сюй, Ю.; Ся, Х.; Чжан, Ц.; Цай, В.; Цзян, Г.; Чжан, Л. Экологически чистое и эффективное извлечение ценных металлов из побочных продуктов гидрометаллургии цинка с целью снижения токсичности // J. Cleaner Prod. - 2022. - Vol. 380. - 134993.

7. Темесген, Т.; Буи, Т.Т.; Хан, М.; Ким, Т.-И.; Парк, Х. Микро- и нанопузырьковые технологии как новый горизонт для методов очистки воды: обзор // Adv. Colloid Interface Sci. - 2017. - Vol. 246. - P. 40-51.

8. Улатовский, К.; Собиешук, П.; Мроз, А.; Чиах, Т. Стабильность нанопузырьков, генерируемых в воде с использованием системы пористых мембран // Chem. Eng. Process. Process Intensif. - 2019. - Vol. 136. - P. 62-71.

9. Такахаши, М. Дзета-потенциал микропузырьков в водных растворах: электрические свойства границы раздела газ-вода // J. Phys. Chem. B. - 2005. - Vol. 109. - P. 21858-21864.

10. Takahashi M.; Chiba K.; Li P. Образование свободных радикалов при схлопывании микропузырьков // Journal of Physical Chemistry B. - 2007. - Т. 111, № 6. - С. 1343–1347.

11. Чжоу, Л.; Ван, С.; Чжан, Л.; Ху, Дж. Генерация и стабильность объемных нанопузырьков: обзор и перспективы // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. - 2021. - Vol. 53. - 101439.



Файзуллаев Джамал Сабахонович – генеральный директор ГП «Навоийуран»
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz

Fayzullaev Djamal Sabakhonovich – General Director of State Enterprise “Navoiyuran”
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz

Fayzullayev Djamal Sabaxonovich – "Navoiyuran" DK bosh direktori
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz



Сапаров Анваржон Бахтиярович – главный инженер ГП «Навоийуран»
E-mail: AB.SAPAROV@NAVOIYURAN.UZ

Saparov Anvarjon Bakhtiyarovich – Chief Engineer of State Enterprise “Navoiyuran”
E-mail: AB.SAPAROV@NAVOIYURAN.UZ

Saparov Anvarjon Baxtiyarovich – “Navoiyuran” DK bosh muhandisi
E-mail: AB.SAPAROV@NAVOIYURAN.UZ



Рузиев Отабек Бахтиёрович – Директор рудоуправления "Зафарабад" ГП «Навоийуран»
E-mail: OB.Ruziev@navoiyuran.uz

Ruziev Otabek Bakhtiyorovich – Director of the Zafarabad Mining Administration of State Enterprise “Navoiyuran”
E-mail: OB.Ruziev@navoiyuran.uz

Ruziyev Otabek Baxtiyorovich – “Navoiyuran” DK “Zafarobod” Ruda boshqarmasi direktori
E-mail: OB.Ruziev@navoiyuran.uz



Бозоров Фарид Ахтамович – Начальник производственной площадки "Учкудук" ГП «Навоийуран»
E-mail: FA.Bozorov@navoiyuran.uz

Bozorov Farid Axtamovich – Head of Uchkuduk Production Area, SE “Navoiyuran”
E-mail: FA.Bozorov@navoiyuran.uz

Bozorov Farid Axtamovich – “Navoiyuran” DK “Uchquduq” ishlab chiqarish maydoni boshlig‘i
E-mail: FA.Bozorov@navoiyuran.uz



Рузиев Бахтиёр Толипович – начальник геотехнологической лаборатории ЦНИЛ по урану ГП «Навоийуран»
E-mail: BT.Ruziyev@navoiyuran.uz

Bakhtiyor Tolipovich Ruziev – Head of the Geotechnological Laboratory of the Central Scientific Research Laboratory for Uranium of the State Enterprise "Navoiyuran"
E-mail: BT.Ruziyev@navoiyuran.uz

Ruziyev Baxtiyor Tolipovich – «Navoiyuran» DK Uranning geotexnologik Markaziy ilmiy-tadqiqot laboratoriyasi boshlig‘i
E-mail: iBT.Ruziyev@navoiyuran.uz

УДК 622.775:622.277 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.4

ПОВЫШЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ УЧАСТКА ПВ «МОЙБУЛОК» ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УРАНА

Файзуллаев Дж.С., Курбонов К.Б., Рузиев Б.Т., Тимербулатов А.Р., Утаев С.М.

ГП «Навоийуран», Республика Узбекистан

Аннотация. *В статье рассмотрена технологическая проблема снижения приемистости нагнетательных скважин участка подземного выщелачивания «Мойбулок», обусловленная кольматацией призабойной зоны и ухудшением фильтрационных характеристик технологических растворов. На основании анализа химического состава продуктивных и хвостовых растворов установлено, что основным фактором кольматации является образование сульфатно-кальциевых отложений, преимущественно гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, в условиях высокой минерализации растворов и роста концентрации сульфат-ионов при подкислении перед сорбцией. Представлены результаты лабораторных исследований влияния антискаланта на основе оксиэтилендендифосфоновой кислоты (ОЭДФ) и азотной кислоты на скорость гравитационной фильтрации растворов. Показано, что дозировка ОЭДФ 5 мг/л повышает скорость фильтрации хвостовых растворов с 308,2 до 439,6 л/(ч·м²), то есть до 142,9 % от исходного уровня. Азотная кислота в дозировке 0,5 мл/л обеспечивает сопоставимое увеличение скорости фильтрации, однако характеризуется более высоким удельным расходом реагента. Дополнительная серия опытов на исходном продуктивном растворе ЛСУ-1 показала максимальный прирост скорости фильтрации при совместном подкислении и применении антискаланта. Полученные результаты обосновывают целесообразность опытно-промышленной проверки профилактического дозирования ОЭДФ и регламентированного кислотного воздействия для восстановления приемистости скважин.*

Ключевые слова*: подземное выщелачивание, уран, Мойбулок, кольматация, гипс, сульфат кальция, фильтрация, ОЭДФ, антискалант, азотная кислота, приемистость скважин.*

«MOYBULOQ» YER OSTI ERITMAGA O‘TKAZISH UCHASTKASIDA URANNI QAZIB OLISHDA TEXNOLOGIK ERITMALARNING FILTRATSIYA XUSUSIYATLARINI OSHIRISH

J.S. Fayzullayev, K.B. Qurbonov, B.T. Ruziyev, A.R. Timerbulatov, S.M. O‘tayev

“Navoiyuran” DK, O‘zbekiston Respublikasi

Annotasiya. *Maqolada «Moybuloq» yer osti tanlab eritmaga o‘tkazish (kimyoviy leaching) uchastkasidagi yuboruuvchi quduqlarning qabul qilish qobiliyati (yutuvchanligi) pasayishi bilan bog‘liq texnologik muammo ko‘rib chiqilgan. Ushbu muammo quduq tubi zonasining kolmatatsiyalanishi (g‘ovaklarning bitib qolishi) va texnologik eritmalar filtratsiya xarakteristikalarining yomonlashishi tufayli yuzaga kelgan. Mahsuldor va qoldiq (vaqtinchalik va tozalangan) eritmalarning kimyoviy tarkibi tahlili asosida shu aniqlandiki, kolmatatsiyaning asosiy omili — eritmalarning yuqori minerallashuvi hamda sorbsiya oldidan kislota qo‘shish (kislotali muhitga o‘tish) jarayonida sulfat-ionlar konsentratsiyasining ortishi sharoitida sulfat-kalsiyli cho‘kmalarning, asosan gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) hosil bo‘lishidir.Eritmalarning gravitatsion filtratsiya tezligiga gidroksietilidendifosfon kislota (GEDFK) va nitrat kislotasi (HNO_3) asosidagi antiskalantning (cho‘kmaga qarshi reagent) ta’sirini laboratoriya sharoitida tadqiq etish natijalari taqdim etilgan. GEDFKning 5 mg/l dozasi qoldiq eritmalarning filtratsiya tezligini 308,2 dan 439,6 l/(soat·m²) gacha, ya’ni dastlabki darajaga nisbatan 142,9 % gacha oshirishi ko‘rsatilgan. Nitrat kislotasi 0,5 ml/l dozasida filtratsiya tezligining shunga o‘xshash o‘sishini ta’minlaydi, biroq u reagentning yuqori solishtirma sarfi bilan xarakterlanadi. Moybuloq maydoni MSU-1 dastlabki mahsuldor eritmasida o‘tkazilgan qo‘shimcha tajribalar seriyasi shuni ko‘rsatdiki, filtratsiya tezligining maksimal o‘sishi bir vaqtning o‘zida kislota bilan muhitni kislotalash va antiskalantni qo‘llash orqali erishiladi. Olingan natijalar quduqlarning qabul qilish qobiliyatini tiklash uchun GEDFKni profilaktik dozalash va reglamentlangan kislotali ta’sir ko‘rsatish usullarini tajriba-sanoat sinovidan o‘tkazish maqsadga muvofiqligini asoslab beradi.*

Kalit so‘zlar: *yer osti tanlab eritmaga o‘tkazish, uran, Moybuloq, kolmatatsiya, gips, kalsiy sulfat, filtratsiya, GEDFK, antiskalant, nitrat kislotasi, quduqlarning qabul qilish qobiliyati.*

IMPROVING THE FILTRATION PROPERTIES OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AT THE “MOYBULOK” ISL SITE DURING IN-SITU LEACHING OF URANIUM

J.S. Fayzullaev, K.B. Kurbonov, B.T. Ruziev, A.R. Timerbulatov, S.M. Utaev

“Navoiyuran” State Enterprise, Republic of Uzbekistan

Abstract. *The paper addresses a critical technological challenge: the decline in the injectivity of injection wells at the "Moybulok" in-situ leaching (ISL) site, caused by intensive near-wellbore clogging (colmatation) and the subsequent deterioration of the filtration characteristics of processing solutions. Based on a comprehensive chemical analysis of both pregnant (PLS) and barren (BLS) solutions, it was established that the primary driver of clogging is the precipitation of calcium sulfate scale, predominantly in the form of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). This process occurs due to high overall solution mineralization and a sharp increase in sulfate ion concentration during the pre-sorption acidification stage. To mitigate this issue, laboratory investigations were conducted to evaluate the effects of an antiscalant based on hydroxyethylidene diphosphonic acid (HEDP) and nitric acid (HNO_3) on the gravity filtration rate of the technological solutions. The experimental data demonstrate that a preventive HEDP dosage of 5 mg/L increases the filtration rate of barren solutions from 308.2 to 439.6 L/(h·m²), reaching 142.9% of the initial baseline. While introducing nitric acid at a dosage of 0.5 mL/L provides a comparable improvement in filtration dynamics, it is associated with a significantly higher specific consumption of the chemical reagent. Furthermore, an additional series of experiments performed on the initial pregnant solution from the local sorption unit (LSU-1) revealed that the maximum increase in filtration efficiency is achieved through a combined approach of synchronized acidification and antiscalant application. The obtained experimental results justify the technical and economic feasibility of moving to pilot-scale testing for preventative HEDP dosing and regulated operational acid treatments to successfully restore and maintain injection well injectivity.*

Keywords: *in-situ leaching, uranium, Moybulok, clogging (colmatage), gypsum, calcium sulfate, filtration, HEDP, antiscalant, nitric acid, well injectivity.*

Введение

В технологии подземного выщелачивания урана устойчивость гидродинамического режима является одним из определяющих факторов эффективности разработки продуктивного горизонта. При снижении приемистости нагнетательных скважин нарушается баланс между закачкой и откачкой растворов, уменьшается производительность участка, возрастает частота восстановительных прокачек и ухудшается управляемость процесса выщелачивания [1].

На участке ПВ «Мойбулок» работы по подземному выщелачиванию были начаты в 2015-2016 гг.; в начальный период испытывались различные способы интенсификации, включая применение гипохлорита натрия, технического кислорода, растворов серной кислоты и надув сжатого воздуха. Устойчивого технологического эффекта эти мероприятия не обеспечили. После возобновления работ в 2020 г. основным окислителем стал кислород воздуха, подаваемый методом надува, а продуктивные растворы с pH 6-7 перед сорбцией подкисляются серной кислотой до pH 2,6-2,7.

Практические наблюдения показали, что после периодических прокачек приемистость скважин может кратковременно увеличиваться до 10-12 м³/ч, однако через 5-6 суток вновь снижается до 2-3 м³/ч. Такой характер восстановления свидетельствует о повторном формировании кольматационных структур в призабойной зоне, а не только о временном механическом засорении фильтровой части скважины.

Целью настоящей работы являлось научно-техническое обоснование применения антискаланта ОЭДФ и кислотного воздействия для повышения фильтрационных свойств технологических растворов участка ПВ «Мойбулок» и стабилизации приемистости нагнетательных скважин.

Объект исследования и постановка проблемы

Объектом исследования являлись технологические растворы участка ПВ «Мойбулок», включая продуктивный раствор, раствор после подкисления перед сорбцией и хвостовые растворы сорбции. Особое внимание уделено системе Ca^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2SO_4, поскольку именно изменение соотношения ионов кальция, сульфат-ионов и кислотности определяет вероятность образования сульфатно-кальциевых осадков.

В сентябре 2025 г. на участке было зафиксировано образование плотных труднорастворимых отложений в технологических коммуникациях и оборудовании. Лабораторные испытания показали низкую растворимость данных отложений: даже при воздействии минеральных кислот и щелочей степень растворения не превышала 2-3 %. По результатам исследований отложения отнесены к сульфатно-кальциевым образованиям, преимущественно гипсу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Рис 1).

Повышение pH продуктивных растворов перед сорбцией до значения около 4 ранее рассматривалось как способ снижения осадкообразования. Однако данное мероприятие не обеспечило положительного технологического эффекта и сопровождалось ухудшением работы сорбционной стадии, выражавшимся в снижении производительности сорбционных колонн. Поэтому дальнейший поиск решений был направлен на реагентное управление кристаллизацией солей и восстановление фильтрационных свойств растворов. С этой целью были отобраны пробы технологических растворов участка «Мойбулок». Химический состав технологических растворов приведен в нижеследующей таблице 1.

Данные таблицы 1 показывают, что исходный продуктивный раствор имеет нейтральную реакцию среды (pH 6,98), содержит уран на уровне 16 мг/л, кальций 550 мг/л и сульфат-ионы 2180 мг/л. После подкисления перед сорбцией pH снижается до 2,62, а концентрация сульфат-ионов увеличивается до 2760 мг/л. В хвостовых растворах сорбции концентрация SO_4^{2-} достигает 2950 мг/л при сохранении высокого содержания кальция. Такая совокупность показателей создает предпосылки для пересыщения растворов по сульфату кальция и кристаллизации гипса в порах продуктивного горизонта.



Рис 1. Процесс кольматации и образование гипсовых отложений в скважинах участка «Мойбулок»

Таблица 1

Химический состав технологических растворов участка ПВ «Мойбулок»

№	Проба	pH	U, мг/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	SiO_2, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	HCO^{3-}/H_2SO_4, мг/л; Fe
1	Продуктивный раствор	6,98	16	550	200,9	20,97	2180	292,8; Fe н/об
2	После подкисления	2,62	16	535	200,9	25,1	2760	0,11; Fe н/об
3	Хвосты сорбции	2,71	н/об	545	200,9	29,7	2950	0,12; Fe н/об

Теоретическое обоснование механизма кольматации

Кольматация фильтрационной зоны скважин при подземном выщелачивании может иметь комплексную природу. К возможным механизмам относятся образование вторичных минеральных осадков, набухание и диспергирование глинистых минералов, механический перенос тонкодисперсных частиц, а также вторичное осаждение смешанных соединений при изменении pH, давления и содержания CO_2. Однако для участка ПВ «Мойбулок» определяющим фактором является образование сульфатно-кальциевых отложений.

Механизм образования гипса заключается в том, что при взаимодействии сернокислых технологических растворов с карбонатсодержащими породами и пластовыми водами происходит поступление кальция в раствор. Одновременно при подкислении растворов и контакте с ионообменной смолой возрастает концентрация сульфат-ионов. В результате при локальном изменении pH, смешении потоков и изменении гидродинамических условий раствор может достигать пересыщения по $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, что приводит к кристаллизации гипса в поровом пространстве и росту гидравлического сопротивления (Рис. 2).

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O\downarrow \quad (1)$$

Исследования осадков, отобранных из скважин на участке Мойбулак с использованием лабораторного рентгеновского дифрактометра Rigaku SmartLab, подтвердили, что образующиеся в скважинах отложения представляют собой сульфат кальция (Рис. 3).



Рис 2. Схема формирования гипсовой кольматации в системе «порода - раствор»

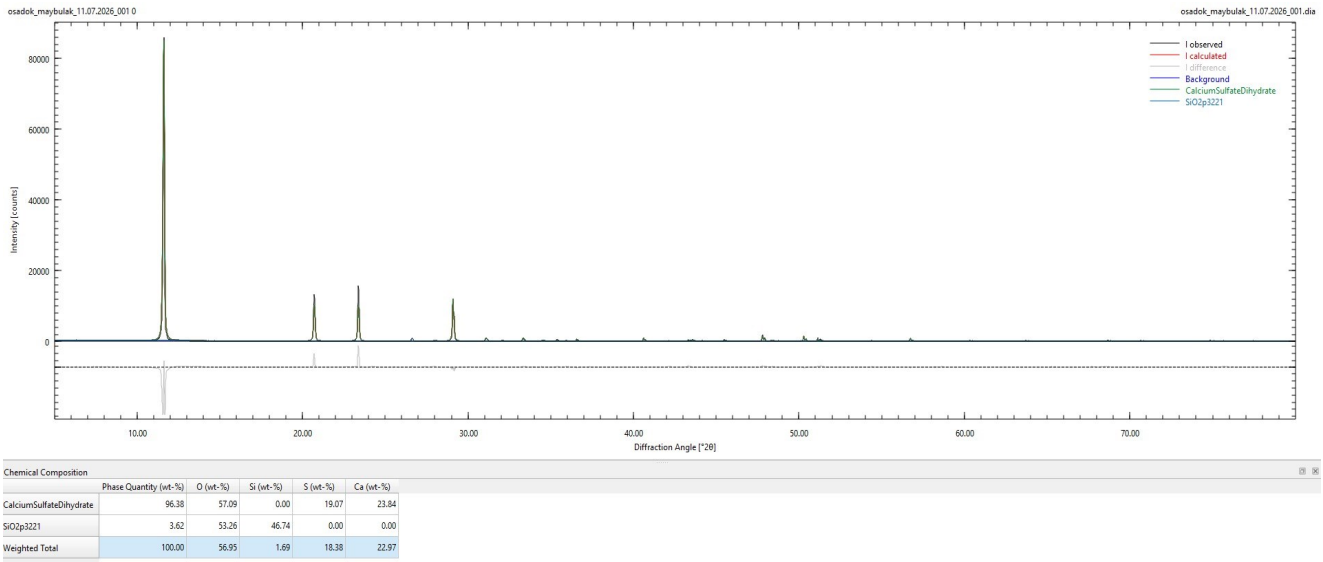


Рис 3. Результаты рентгенофазового анализа осадков, отобранных на участке Мойбулак, полученные на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab

Антискалант ОЭДФ относится к фосфонатным ингибиторам солеотложений. Его действие связано не с растворением уже сформированной массы осадка, а с подавлением образования зародышей кристаллов, замедлением роста кристаллов гипса и предотвращением агрегации частиц. Поэтому ОЭДФ целесообразно рассматривать прежде всего как профилактический реагент для стабилизации фильтрационных свойств растворов [2].

Антискалант ОЭДФ —гидроксиэтилидендифосфоновая кислота, относится к фосфонатным ингибиторам солеотложений. Молекула ОЭДФ содержит две фосфоновые группы $–PO_3H_2$, способные связываться с ионами кальция и адсорбироваться на активных центрах поверхности кристаллов сульфата кальция. Поэтому механизм его действия заключается не в стехиометрическом растворении уже сформированной массы гипсового осадка, а в ингибировании стадий зародышеобразования и роста кристаллов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Образование гипса в технологических растворах может быть представлено реакцией:

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O\downarrow \quad (2)$$

В присутствии ОЭДФ часть ионов кальция связывается фосфонатными группами с образованием растворимых кальций-фосфонатных комплексов:

$$Ca^{2+} + HEDP^{4-} \rightleftarrows [Ca–HEDP]^{2-} \quad (3)$$

Кроме того, молекулы ОЭДФ адсорбируются на активных центрах растущих кристаллов гипса:

$\equiv Ca^{2+}$(поверхность $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) + $HEDP^{4-} \rightleftarrows \equiv Ca–HEDP^{2-}$ (адсорбированный слой)

В результате блокируются центры роста кристаллов, снижается скорость присоединения ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} к поверхности гипса, подавляется укрупнение частиц и уменьшается вероятность образования плотных кольматирующих отложений в поровом пространстве. Данный механизм подтверждается исследованиями адсорбции фосфонатов на кристаллах гипса: установлено, что для торможения роста достаточно покрытия только 4–5 % активных центров поверхности, а сам процесс адсорбции фосфонатов протекает быстро и практически необратимо [3].

Эффект ОЭДФ объясняется именно пороговым ингибированием кристаллизации, то есть воздействием на зародыши и активные центры роста кристаллов, а не массовым растворением гипса (Рис. 4).

Действие ОЭДФ при дозировке 5 мг/л следует рассматривать как пороговое ингибирование гипсообразования: реагент не растворяет уже сформированную массу гипсового осадка, а блокирует активные центры зародышеобразования и роста кристаллов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ за счет комплексообразования с Ca^{2+} и адсорбции фосфонатных групп на поверхности кристаллов. Поэтому ОЭДФ технологически целесообразен прежде всего как профилактический реагент для предупреждения кольматации и стабилизации фильтрационных свойств растворов.)

Азотная кислота действует по другому механизму: она обеспечивает кислотное воздействие на минеральные отложения, разрушает цементирующие соединения и способствует очистке порового пространства. В частности, при наличии карбонатных фаз протекает реакция растворения с образованием растворимых нитратов кальция:

$$CaCO_3 + 2HNO_3 > Ca(NO_3)_2 + CO_2\uparrow + H_2O \quad (4)$$

Лабораторные исследования фильтрационных свойств проводились методом гравитационной фильтрации без применения внешнего давления и вакуума. В качестве фильтрующей среды использовалась фильтровальная бумага типа «белая лента» диаметром 90 мм с площадью фильтрации 0,00636 м^2 и размером пор 7-11 мкм. Объем фильтруемого раствора составлял 0,15 л.

В первой серии опытов исследовались хвостовые растворы сорбции с pH 2,62. В раствор вводили ОЭДФ в дозировках 5, 10 и

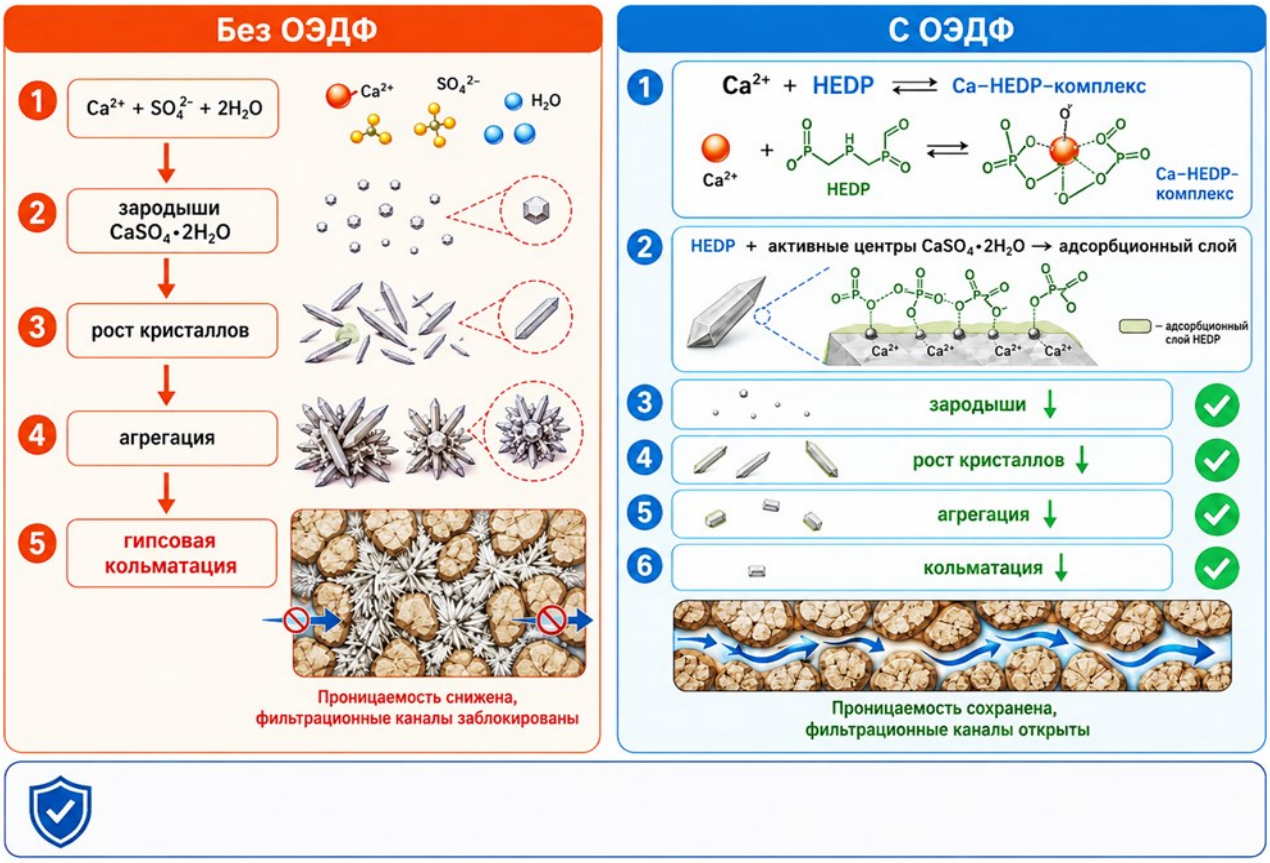


Рис 4. Схема механизма действия ОЭДФ

Таблица 2

Влияние ОЭДФ и HNO_3 на фильтрацию хвостовых растворов сорбции

Состав раствора	Время фильтрации, с	Скорость, л/час	Скорость, л/(ч·м²)	Изменение, %	Расход реагента, сум/м³
Хвосты сорбции (pH 2,62), исходный	275	1,96	308,2	100,0	-
Хвосты сорбции + 5 мг/л ОЭДФ	193	2,80	439,6	142,9	120,37
Хвосты сорбции + 10 мг/л ОЭДФ	237	2,28	358,5	116,3	240,74
Хвосты сорбции + 15 мг/л ОЭДФ	211	2,56	401,9	130,6	361,12
Хвосты сорбции + HNO^3 0,2 мл/л	204	2,65	416,0	135,2	388,08
Хвосты сорбции + HNO^3 0,5 мл/л	193	2,80	439,6	142,9	970,20

Расчет расхода выполнен по ценовым данным 2026 г. и курсу 1 USD = 12 037,21 сум

15 мг/л, а также азотную кислоту в дозировках 0,2 и 0,5 мл/л. В каждом опыте фиксировали время фильтрации заданного объема, после чего рассчитывали скорость фильтрации в л/час и удельную скорость фильтрации, отнесенную к площади фильтра.

Во второй серии опытов исследовался исходный продуктивный раствор Мойбулок ЛСУ-1. Условия опытов: объем раствора 150 мл, перемешивание 15 минут, отстой 1 час. Сравнивались четыре варианта: исходный раствор, подкисленный раствор, исходный раствор с антискалантом и подкисленный раствор с антискалантом (Рис. 5, *Табл. 2*).

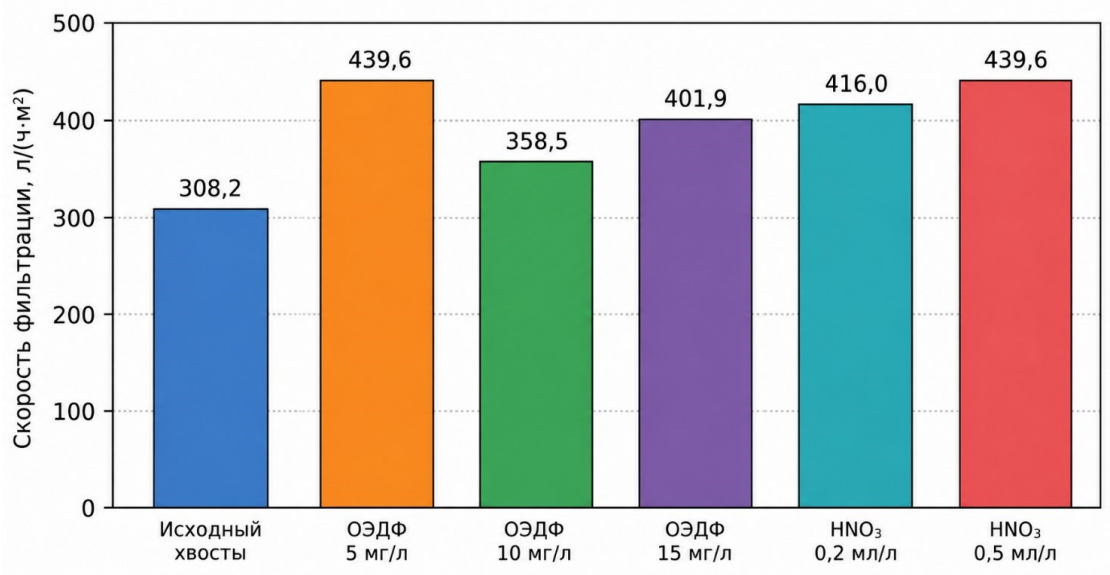


Рис 5. Изменение скорости фильтрации хвостовых растворов при обработке ОЭДФ и HNO_3

Результаты таблицы 2 показывают, что как ОЭДФ, так и азотная кислота положительно влияют на фильтрационные свойства хвостовых растворов сорбции. Наиболее эффективной и экономически предпочтительной дозировкой ОЭДФ является 5 мг/л: время фильтрации сокращается с 275 до 193 с, а скорость фильтрации возрастает с 308,2 до 439,6 л/(ч·м²). При увеличении дозировки ОЭДФ до 10 и 15 мг/л дополнительного усиления эффекта не наблюдается, что может быть связано с достижением оптимальной концентрации ингибитора и изменением коллоидно-химического состояния раствора.

Азотная кислота в дозировке 0,5 мл/л обеспечивает такой же относительный прирост скорости фильтрации - 142,9 %, однако стоимость реагентной обработки составляет 970,20 сум/м³ против 120,37 сум/м³ для ОЭДФ 5 мг/л. Следовательно, при сопоставимом лабораторном эффекте ОЭДФ имеет более высокую технико-экономическую привлекательность для постоянного или периодического профилактического дозирования.

Дополнительная серия опытов на продуктивном растворе ЛСУ-1 подтвердила высокую эффективность антискаланта. Простое подкисление раствора до pH 2,62 повысило скорость фильтрации с 21,28 до 35,71 мл/мин, что соответствует приросту 67,8 %. Введение антискаланта в исходный раствор обеспечило увеличение скорости до 111,94 мл/мин (+426,1 %), однако раствор оставался мутным. Максимальный результат получен при совместном подкислении и добавке антискаланта: скорость фильтрации достигла 125,00 мл/мин, прирост составил 487,4 %, а раствор был прозрачным (Табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная эффективность подкисления и антискаланта на исходном продуктивном растворе Мойбулок ЛСУ-1

№ опыта	Условия	pH	Время, мин	Скорость, мл/мин	Прирост скорости, % / примечание
1	Исходный раствор - контроль	6,98	7,05	21,28	0; муть
2	Подкисленный раствор	2,62	4,20	35,71	+67,8; прозрачный
3	Исходный + антискалант	7,35	1,34	111,94	+426,1; муть
4	Подкисленный + антискалант	2,95	1,20	125,00	+487,4; прозрачный

Условия опыта: объем 150 мл; перемешивание 15 мин; отстой 1 час

Практическое значение данного результата состоит в том, что подкисление стабилизирует визуальное состояние раствора и может улучшать условия сорбции, тогда как антискалант оказывает основной эффект на предотвращение кристаллизационно-коллоидной кольматации. Совместное применение может рассматриваться как наиболее эффективный лабораторный режим, однако его промышленная реализация должна оцениваться с учетом расхода кислоты, влияния на сорбцию, коррозионной активности среды и режима закачки растворов в пласт.

Обсуждение результатов

Полученные данные позволяют выделить два технологических направления: профилактическое предотвращение гипсовой кольматации и восстановление фильтрационной среды при уже сформированных отложениях. Для профилактического направления предпочтительным является ОЭДФ в дозировке 5 мг/л, поскольку данная концентрация обеспечивает максимальный лабораторный эффект при минимальном расходе реагента. Более высокие концентрации ОЭДФ не повышают эффективность пропорционально расходу, поэтому их применение без дополнительного обоснования экономически нецелесообразно.

Азотная кислота в дозировке 0,5 мл/л демонстрирует сопоставимый прирост фильтрации, но реализует эффект через кислотное воздействие и растворение минеральных соединений. Поэтому HNO_3 целесообразно рассматривать как реагент периодической

обработки скважин или участков с выраженной кольматацией, а не как основной реагент постоянного дозирования.

С учетом производственных наблюдений, при которых гидродинамическая прокачка обеспечивает восстановление приемистости только на 5-6 суток, применение одного механического способа не устраняет причину кольматации. Наиболее рациональной представляется комбинированная схема: поддержание стабильного химического режима растворов с профилактическим дозированием ОЭДФ и отдельное регламентированное кислотное воздействие для скважин, где уже сформировались плотные отложения.

При переносе лабораторных результатов в опытно-промышленные условия необходимо учитывать, что фильтрация через бумажный фильтр моделирует только часть процессов, происходящих в пористой среде пласта. В реальных условиях дополнительно влияют минералогический состав песчаников, содержание глинистых частиц, скорость фильтрации, давление, CO_2-баланс, температура, смешение потоков и неоднородность призабойной зоны. Поэтому оптимальные дозировки должны уточняться на опытном блоке с обязательным контролем приемистости, химического состава растворов и показателей сорбции.

Выводы

Основной причиной снижения приемистости нагнетательных скважин участка ПВ «Мойбулок» является кольматация призабойной зоны, обусловленная образованием сульфатно-кальциевых отложений, преимущественно гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Химический состав растворов подтверждает наличие условий для гипсообразования: при подкислении перед сорбцией концентрация SO_4^{2-} возрастает с 2180 до 2760 мг/л, а в хвостах сорбции достигает 2950 мг/л при сохранении содержания кальция на уровне 535-550 мг/л.

Лабораторные опыты показали, что ОЭДФ в дозировке 5 мг/л повышает скорость фильтрации хвостовых растворов с 308,2 до 439,6 л/(ч·м^2), что соответствует 142,9 % от исходного уровня.

Азотная кислота в дозировке 0,5 мл/л обеспечивает сопоставимое увеличение скорости фильтрации до 439,6 л/(ч·м^2), однако расчетная стоимость реагентной обработки выше, чем при применении ОЭДФ 5 мг/л.

На продуктивном растворе ЛСУ-1 максимальный эффект получен при совместном подкислении и применении антискаланта: скорость фильтрации увеличилась до 125,00 мл/мин, а прирост составил 487,4 % относительно исходного раствора.

Для опытно-промышленной проверки рекомендуется рассматривать ОЭДФ как профилактический реагент предотвращения солеотложений, а HNO_3 - как средство периодического восстановления фильтрационных свойств при уже сформированной кольматации.

Библиографический список:

1. М. И. Фазлулин, В. А. Грабовников и др., *Добыча урана методом подземного выщелачивания*. Moskva: Atomizdat, 1980, s. 45–50.
2. PubChem. Etidronic Acid (1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid, HEDP), CID 3305. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine.
3. Popov K., Oshchepkov M., Afanas'eva E., Koltinova E., Dikareva Y., Ronkkomaki H. A new insight into the mechanism of the scale inhibition: DLS study of gypsum nucleation in presence of phosphonates using nanosilver dispersion as an internal light scattering intensity reference // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. Vol. 560. P. 122-129. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.015.
4. International Atomic Energy Agency. Manual of Acid in Situ Leach Uranium Mining Technology. IAEA-TECDOC-1239. Vienna: IAEA, 2001. 294 p.
5. International Atomic Energy Agency. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1.4. Vienna: IAEA, 2016.
6. OECD Nuclear Energy Agency; International Atomic Energy Agency. Uranium 2024: Resources, Production and Demand. Paris: OECD Publishing, 2025.
7. Li G., Yao J. A Review of In Situ Leaching (ISL) for Uranium Mining // Mining. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 120-148. DOI: 10.3390/mining4010009.
8. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3: A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43. Reston: USGS, 2013. DOI: 10.3133/tm6A43.
9. Stawski T.M., van Driessche A.E.S., Ossorio M., Rodriguez-Blanco J.D., Besselink R., Benning L.G. Formation of calcium sulfate through the aggregation of sub-3 nanometre primary species // Nature Communications. 2016. Vol. 7. Article 11177. DOI: 10.1038/ncomms11177.
10. Rabizadeh T., Peacock C.L., Benning L.G. Investigating the Effectiveness of Phosphonate Additives in Hindering the Calcium Sulfate Dihydrate Scale Formation // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. Vol. 59, No. 33. P. 14970-14980. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03600.
11. Weijnen M.P.C., van Rosmalen G.M. Adsorption of phosphonates on gypsum crystals // Journal of Crystal Growth. 1986. Vol. 79, Issues 1-3. P. 157-168. DOI: 10.1016/0022-0248(86)90431-8.
12. Amjad Z. Calcium sulfate dihydrate (gypsum) scale formation on heat exchanger surfaces: The influence of scale inhibitors // Journal of Colloid and Interface Science. 1988. Vol. 123, No. 2. P. 523-536. DOI: 10.1016/0021-9797(88)90274-3.
13. Amjad Z., Landgraf R., Penn J. Calcium sulfate dihydrate (gypsum) scale inhibition by PAA, PAPEMP, and PAA/PAPEMP blend // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2014. Vol. 3, No. 1. P. 35-47. DOI: 10.17675/2305-6894-2014-3-1-035-047.
14. Antony A., Low J.H., Gray S., Childress A.E., Le-Clech P., Leslie G. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review // Journal of Membrane Science. 2011. Vol. 383, Issues 1-2. P. 1-16. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.08.054.
15. Mazumder M.A.J. A Review of Green Scale Inhibitors: Process, Types, Mechanism and Properties // Coatings. 2020. Vol. 10, No. 10. Article 928. DOI: 10.3390/coatings10100928.
16. Разработка и обоснование мероприятий по интенсификации процесса подземного выщелачивания на участке ПВ «Мойбулок». Внутренний технический отчет ГП «Навоийуран», ЦНИЛ по урану, 2026.



Файзуллаев Джамал Сабахонович – генеральный директор ГП «Навоийуран»
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz

Fayzullaev Djamal Sabakhonovich – General Director of State Enterprise “Navoiyuran”
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz

Fayzullayev Djamal Sabaxonovich – "Navoiyuran" DK bosh direktori
E-mail: DjS.Fayzullayev@navoiyuran.uz



Курбонов Келдиёр Бахтиярович – Начальник Центральной научно-исследовательской лаборатории по урану ГП «Навоиуран»
E-mail: KB.Qurbonov@navoiyuran.uz

Keldiyor Baxtiyarovich Qurbonov – Head of the Central Scientific Research Laboratory for Uranium, State Enterprise “Navoiyuran”
E-mail: KB.Qurbonov@navoiyuran.uz

Qurbonov Keldiyor Baxtiyarovich – «Navoiyuran» DK Uran bo‘yicha markaziy ilmiy-tadqiqot laboratoriyasi boshlig‘i
E-mail: KB.Qurbonov@navoiyuran.uz



Рузиев Бахтиёр Толипович – начальник геотехнологической лаборатории ЦНИЛ по урану ГП «Навоийуран»
E-mail: BT.Ruziyev@navoiyuran.uz

Bakhtiyor Tolipovich Ruziev – Head of the Geotechnological Laboratory of the Central Scientific Research Laboratory for Uranium of the State Enterprise "Navoiyuran"
E-mail: BT.Ruziyev@navoiyuran.uz

Ruziyev Baxtiyor Tolipovich – «Navoiyuran» DK Uranning geotexnologik Markaziy ilmiy-tadqiqot laboratoriyasi boshlig‘i
E-mail: iBT.Ruziyev@navoiyuran.uz



Тимербулатов Артур Ринатович – Инженер-технолог геотехнологической лаборатории ЦНИЛ по урану ГП «Навоиуран»
E-mail: TR.Timerbulatov@navoiyuran.uz

Artur Rinatovich Timerbulatov – Engineer-Technologist at the Geotechnical Laboratory of the Central Scientific Research Laboratory for Uranium, State Enterprise "Navoiyuran"
E-mail: TR.Timerbulatov@navoiyuran.uz

Timerbulatov Artur Rinatovich – «Navoiyuran» DK Uran bo‘yicha MITL geotexnologik laboratoriyasi muhandis-texnologi
E-mail: TR.Timerbulatov@navoiyuran.uz



Утаев Санжарбек Миркомил угли – Инженер-технолог геотехнологической лаборатории ЦНИЛ по урану ГП «Навоиуран»
E-mail: SM.Utayev@navoiyuran.uz

Sanjarbek Mirkomil ugli Utaev – Engineer-Technologist at the Geotechnical Laboratory of the Central Scientific Research Laboratory for Uranium, State Enterprise "Navoiyuran"
E-mail: SM.Utayev@navoiyuran.uz

O‘tayev Sanjarbek Mirkomil o‘g‘li – «Navoiyuran» DK Uran bo‘yicha MITL geotexnologik laboratoriyasi muhandis-texnologi
E-mail: SM.Utayev@navoiyuran.uz

UDC 550.4:553.495/553.493.6(575.1) DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.5

GEOCHEMICAL INDICATORS OF THE PROSPECTS OF URANIUM-BEARING AREAS IN WESTERN UZBEKISTAN

B.A. Elibaev, B.I. Mirkhodjaev

“Navoiyuran” State Enterprise, Republic of Uzbekistan

Abstract. *The study investigates the systematic redistribution of rare earth elements (REEs) during the advancement of the roll-front oxidation zone, which is one of the main mechanisms responsible for the formation of hydrogeogenic uranium mineralization in the platform cover. It has been established that changes in the geochemical state of ore-bearing solutions during the development of redox processes are reflected in the distribution patterns of lanthanides and in the La/Yb, La/Lu, Ce/Eu, and other ratios. These parameters can be used as geochemical indicators of the intensity and direction of palaeohydrogenic ore-forming systems. Analysis of REE relationships made it possible to identify the patterns of fractionation between light and heavy lanthanides, assess their migration and redistribution within the studied areas, and evaluate the intensity of hydrogeogenic ore-forming processes. Different degrees of ore-forming activity were established: the highest intensity was recorded in Area III, an intermediate intensity in Area II, and the lowest intensity in Area I. Based on the identified patterns, a methodology for delineating geochemical profiles is proposed, enabling assessment of the intensity of palaeohydrogenic systems and the prospectivity of uranium mineralization targets. The results confirm the informative value of REE ratios for the geochemical assessment of the formation conditions and spatial development of hydrogeogenic uranium mineralization.*

Key words: *rare earth elements, redox potential, chondrite normalization, geochemical trend, fractionation, geochemical anomaly, accessories, ore-bearing horizon, sandstone type, geochemical barrier, light and heavy lanthanides, carrier minerals.*

G‘ARBIY O‘ZBEKISTON URANLI MAYDONLARINING ISTIQBOLLILIGI BO‘YICHA GEOKIMYOVIY INDIKATORLAR

B.A. Elibayev, B.I. Mirxodjayev

"Navoiyuran" davlat korxonasi, O‘zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Platforma qoplamida gidrogen uran ma’danlashuvining shakllanishidagi asosiy mexanizmlardan biri bo‘lgan qatlamiy oksidlanish zonasining siljishi jarayonida noyob yer elementlarining (NYE) qonuniyatli qayta taqsimlanishi o‘rganildi. Rudali eritmalarning oksidlanish-qaytarilish jarayonlari rivojlanishi davomida geokimyoviy holatining o‘zgarishi lantanoidlarning taqsimlanish xususiyatlari hamda La/Yb, La/Lu, Ce/Eu va boshqa nisbatlarda o‘z aksini topishi aniqlandi. Mazkur ko‘rsatkichlardan paleogidrogen rudalanish tizimlarining intensivligi va yo‘nalishini ifodalovchi geokimyoviy indikatorlar sifatida foydalanish mumkin. NYElarning o‘zaro nisbatlarini tahlil qilish yengil va og‘ir lantanoidlarning fraksiyalanish xususiyatlarini aniqlash, ularning o‘rganilgan maydonlardagi migratsiyasi va qayta taqsimlanishini baholash hamda gidrogen rudalanish jarayonlarining intensivligini aniqlash imkonini berdi. Rudalanish jarayonlari intensivligining turlicha darajalari aniqlandi: eng yuqori intensivlik III-maydonda, o‘rtacha intensivlik II-maydonda, eng past intensivlik esa I-maydonda qayd etildi. Aniqlangan qonuniyatlar asosida geokimyoviy profillarni ajratish metodikasi taklif etildi. Ushbu metodika paleogidrogen tizimlar faoliyati intensivligini va uran ma’danlashuvi obyektlarining istiqbolliligini baholash imkonini beradi. Olingan natijalar NYE nisbatlarining gidrogen uran ma’danlashuvining shakllanish sharoitlari va hududiy rivojlanishini geokimyoviy baholashdagi informativligini tasdiqlaydi.*

Kalit so‘zlar: *noyob yer elementlari, oksidlanish-qaytarilish potentsiali, xondritlarni normallashtirish, geokimyoviy tendentsiya, fraktsiyalanish, geokimyoviy anomaliya, qo'shimchalar, ma’danli gorizont, qumtosh turi, geokimyoviy to'siq, yengil va og'ir lantanoidlar, tashuvchi minerallar.*

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ УРАНОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ЗАПАДНОГО УЗБЕКИСТАНА

Элибаев Б.А., Мирходжаев Б.И.

Государственное предприятие “Навоийуран”, Республика Узбекистан

Аннотация. *Исследовано закономерное перераспределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в процессе продвижения зоны пластового окисления, являющейся одним из основных механизмов формирования гидрогенного уранового оруденения в платформенном чехле. Установлено, что изменение геохимического состояния рудоносных растворов в ходе развития окислительно-восстановительных процессов отражается в характере распределения лантаноидов и соотношениях La/Yb, La/Lu, Ce/Eu и др. Данные показатели могут использоваться в качестве геохимических индикаторов интенсивности и направленности палеогидрогенных рудообразующих систем. Анализ взаимоотношений РЗЭ позволил выявить особенности фракционирования лёгких и тяжёлых лантаноидов, оценить характер их миграции и перераспределения в пределах исследованных площадей. Установлена неодинаковая интенсивность рудообразующих процессов: наиболее высокая степень их проявления отмечена на площади III, средняя — на площади II, минимальная — на площади I. На основании выявленных закономерностей предложена методика выделения геохимических профилей, позволяющая оценивать интенсивность деятельности палеогидрогенных систем и степень перспективности урановорудных объектов. Полученные результаты подтверждают информативность соотношений РЗЭ при геохимической оценке условий формирования и пространственного развития гидрогенного уранового оруденения.*

Ключевые слова: *редкоземельные элементы, редокс-потенциал, нормирование по хондриту, геохимический тренд, фракционирование, геохимическая аномалия, акцессории, рудоносный горизонт, песчаниковый тип, геохимический барьер, лёгкие и тяжёлые лантаноиды, минералы-носители.*

Introduction

Driven by research conducted over the past two decades in Uzbekistan, specialized geochemical criteria have been developed to discover concealed ore deposits [16, 23]. This line of inquiry has become increasingly critical as critical minerals and ore elements—among which rare earth elements (REEs) occupy a leading position—take center stage in global economic security [2, 17]. Geochemical analytical methods allow researchers to decipher the state, distribution, and migration characteristics of REEs, which typically exhibit low crustal abundances and rarely form independent mineral phases.

The concentration ratios of these lanthanides provide a reliable framework for decoding deposit genesis, tracking ore precipitation conditions, and identifying the provenance of ore-bearing fluids [5]. For instance, a systematic compositional shift toward Sm–Yb enrichments relative to baseline La concentrations serves as a proximal indicator of an approaching uranium ore body. Consequently, investigating the distribution of REEs within the Earth's crust, particularly inside uranium deposits, represents a powerful tool for geologists tasked with predicting and exploring new mineral resources.

Methodology and Geological Justification

To obtain precise constraints on host rock genesis, crystallization environments (e.g., redox potential and pressure), magma differentiation processes, fluid involvement, and geochemical anomalies, this study utilizes chondrite-normalized REE ratios.

Chondrite normalization is required to extract meaningful geochemical trends from the raw analytical data of host rocks. In nature, the concentrations of elements with even atomic numbers are inherently higher than those with odd atomic numbers—a phenomenon governed by the **Oddo–Harkins rule**. Plotting raw concentrations yields a jagged, "sawtooth" pattern that defies clean thermodynamic interpretation. Because chondritic meteorites serve as a proxy for the primitive material of the early Solar System, normalizing raw data against them effectively filters out primitive cosmic noise, highlighting anomalies driven purely by terrestrial geological processes.

To properly interpret the geochemical signatures of uranium systems, normalized values (expressed in g/t or ppm) are typically calculated relative to standard chondrite values or the Post-Archean Australian Shale (PAAS) reference frame [10]. In uranium exploration, three widespread deposit types are conventionally distinguished using these parameters [9]:

1) **Sandstone-type deposits:** Characterized by Ce/Ce < 0.8 and Eu/Eu approx 1.0.

2) **Granite-related hydrothermal vein-type deposits:** Distinguished by Eu/Eu < 0.5 combined with marked light rare earth element (LREE) enrichment.

3) **Unconformity-related deposits:** Characterized by heavy rare earth element (HREE) enrichment and an Eu/Eu > 1.2 signature.

Key exploratory indicators, such as europium (Eu) and cerium (Ce) anomalies, are mathematically calculated using specific elemental ratios derived from laboratory analysis. The reference chondrite baseline values (g/t or ppm) used in this study [13] are presented in Table 1.

Specifically, our investigation relies on the following calculated

Table 1

Reference Chondrite Concentrations of Rare Earth Elements

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
0.237	0.612	0.093	0.457	0.148	0.056	0.199
Tb	**Dy**	**Ho**	**Er**	**Tm**	**Yb**	**Lu**
0.036	0.246	0.055	0.160	0.025	0.161	0.024

geochemical relationships:

Eu/Eu (Europium anomaly): An indicator of redox conditions (oxic vs. anoxic states) and the degree of magmatic differentiation. Anomalies are classified as negative (< 1) or positive (> 1).

Ce/Ce (Cerium anomaly): A sensitive proxy for redox variations, frequently applied in hydrogeochemistry and sedimentary basin analysis. Positive anomalies denote strongly reducing environments, whereas negative anomalies reflect oxic conditions where fluid-mobile Ce^{3+} oxidizes to the highly immobile Ce^{4+} state, causing it to precipitate out of solution.

La/Yb and La/Lu: Ratios reflecting the slope of the normalized

REE spectrum (LREE/HREE fractionation). High values (La/Yb > 1) reflect steep spectra and a relative enrichment in light lanthanides.

LREE/HREE: Quantifies the overall enrichment magnitude of light lanthanides relative to heavy lanthanides.

Ce/Eu: Utilized to fine-tune the combined behavior of Ce and Eu during petrogenesis, separating the signatures of crystal fractionation (Eu) from pure redox fluctuations (Ce).

Results

Sampling was conducted on the host rock sequences of three distinct uranium-bearing target areas located within Western Uzbekistan (Fig. 1). Areas I and II are situated within the Central Kyzylkum region, whereas Area III is located within the Sultanuvais Mountains (comprising the distinct "Northern" and "Southern" sectors).

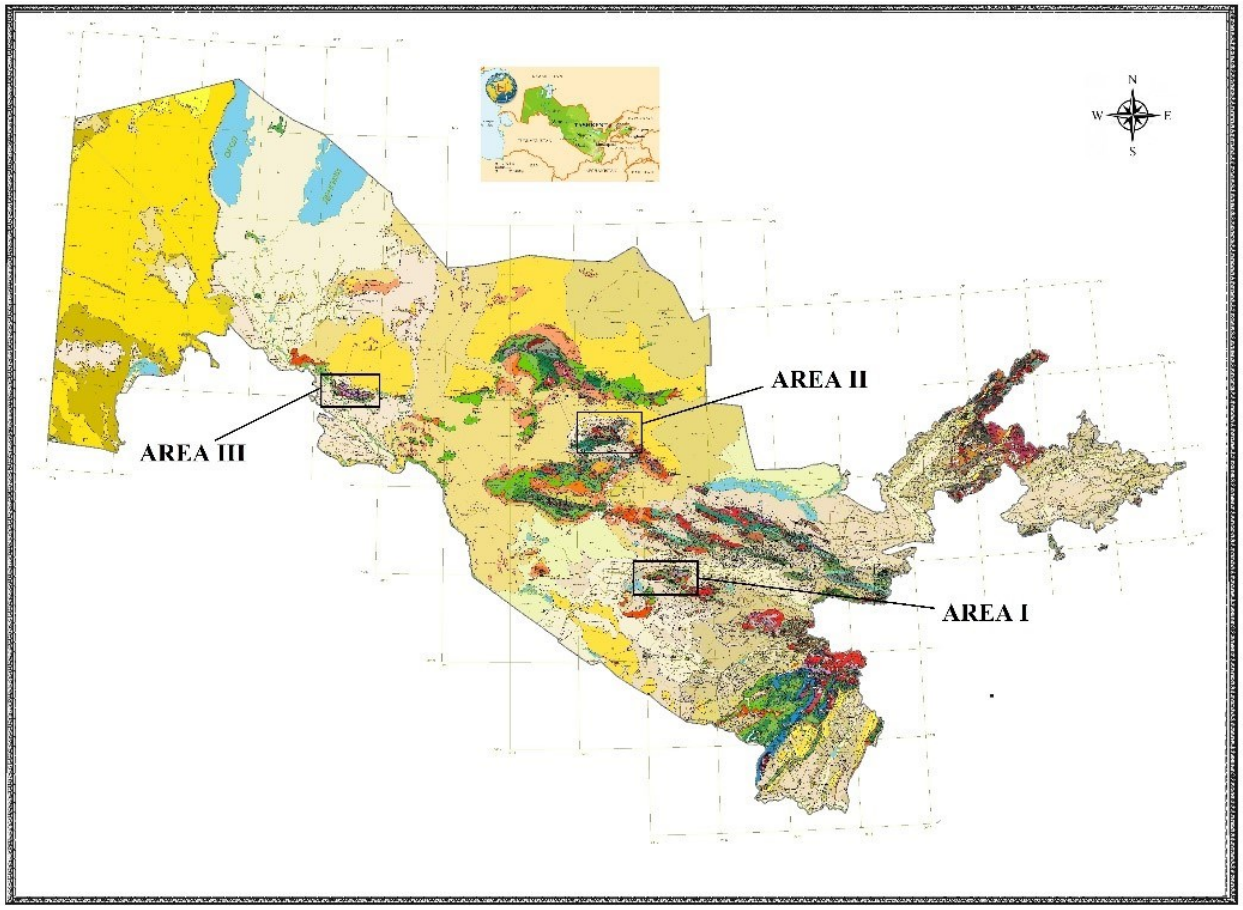


Fig. 1: Outline map showing the locations of the studied areas in Western Uzbekistan

Area I. Calculations derived from the normalized analytical dataset yielded baseline geochemical parameters from which several preliminary insights can be drawn:

● The europium anomaly (Eu/Eu) yields a value of **0.85** (with a mean absolute Eu concentration of **1.04 ppm**). This moderately negative anomaly forms a distinct trough on the spider diagram (Fig. 2, a), which is highly typical for ore-forming fluids genetically tied to felsic igneous rocks, primarily granites [7].

● The fractionation proxy (La/Yb) evaluates to **7.48**, indicating substantial LREE enrichment over HREEs, a signature indicative of metasomatic overprinting. Conversely, HREE behavior—expressed via the Yb/Lu ratio—measures **0.97**. The right-hand segment of the spectrum (from Yb to Lu) displays a nearly horizontal profile (Fig. 2, a), confirming the stability of heavy lanthanides in uranium ores in the absence of strong fluoride complexation processes [11, 22].

Area II. The target geochemical indicators within this exploration block revealed markedly different anomalous behaviors:

● The europium anomaly (Eu/Eu) reaches **1.60** (with a mean absolute Eu concentration of **3.4 ppm**). In uranium geology, values exceeding 1.5 indicate a strong positive anomaly, implying that the ore-bearing fluids were deeply reduced and characterized by elevated temperatures (likely exceeding **200 °C**).

● Concurrently, a sharp spike in Lu (**40.83 ppm**) relative to Yb (**7.08 ppm**) is observed. This feature is likely tied to the presence of specific uranium-accessory minerals that naturally concentrate heavy lanthanides, such as xenotime, alongside high-iron chlorites (e.g., clinochlore and ripidolite).

The distinct signatures of this area are plotted in Fig. 2 (b), where the arrow highlights the prominent europium peak.

● **Geochemical Forecast:** This configuration (an Eu peak coupled with an asymmetrical Lu upswing) often points to highly mineralized, high-grade ores where uranium precipitates rapidly across a sharp geochemical barrier. The mineralogical occurrence of xenotime and / or

chlorite, paired with elevated Fe and Mn concentrations, underscores the significant scale of this reducing system.

● The La/Sc ratio was used to constrain the paleotectonic setting of the basin architecture. For Area II, this ratio yields **4.51**, a value highly characteristic of ore fluids operating within passive continental margins or intracontinental rift zones, effectively ruling out island-arc or active oceanic configurations [12, 20].

Area III. The "Northern" prospect is localized within the northeastern sector of the Sultanuvais Mountains. Geochemical indicators calculated from quantitative laboratory assays for REEs, uranium (U), and thorium (Th) yielded the following insights:

● The europium anomaly (Eu/Eu) is **0.87** (mean Eu = 0.88 ppm) and the cerium anomaly (Ce/Ce) is **0.86**. This coupled signature reveals the active participation of low-temperature, exogenic (surface) meteoric waters operating under fluctuating redox conditions.

● The calculated Y/Ho ratio is **31.1** (compared to the primitive chondritic baseline of 28), which confirms an aqueous, fluid-dominated environment [6].

The chondrite-normalized distribution diagram reveals a smooth, clean REE profile devoid of erratic HREE spikes (Fig. 2, c).

A comparative analysis shows that while Area II represents a high-temperature system with strong Eu anomalies and high-grade ore accumulation, Area III reflects a lower-energy, more stable ore-forming regime. In the Northern sector of Area III, the mean uranium concentration is **25 ppm** (relative to a regional granite background of 3–5 ppm), accompanied by a very low Th/U ratio of **0.13**. This indicates a significant influx of uranium introduced via epigenetic solutions, yielding lower -temperature (Eu/Eu = 0.87), lower-grade, but laterally extensive roll-front style configurations, characteristic of large sedimentary basin architectures [8, 15]. However, a uranium concentration of 25 ppm is highly indicative of distal dispersion halos, suggesting that these samples reflect the periphery of the mineralized system rather than its high-grade core.

Data collected from the "Southern" prospect within Area III provides deeper clarity regarding ore genesis in the complex Sultanuvais region. The geochemical signatures clearly indicate high resource potential, marked by elevated concentrations of La (up to **13.00 ppm**), Ce (up to **36.00 ppm**), and Nd (up to **40.00 ppm**) in association with Y—a classic signature of sandstone-hosted roll-front systems. To construct the normalized profile for this sector (Fig. 2, d), the standard reference values after [4] were applied:

- **La:** 0.310 | **Ce:** 0.808 | **Pr:** 0.122 | **Nd:** 0.600 | **Sm:** 0.181
- **Eu:** 0.0722 | **Gd:** 0.259 | **Dy:** 0.322 | **Er:** 0.210 | **Yb:** 0.209 | **Y:** 1.56

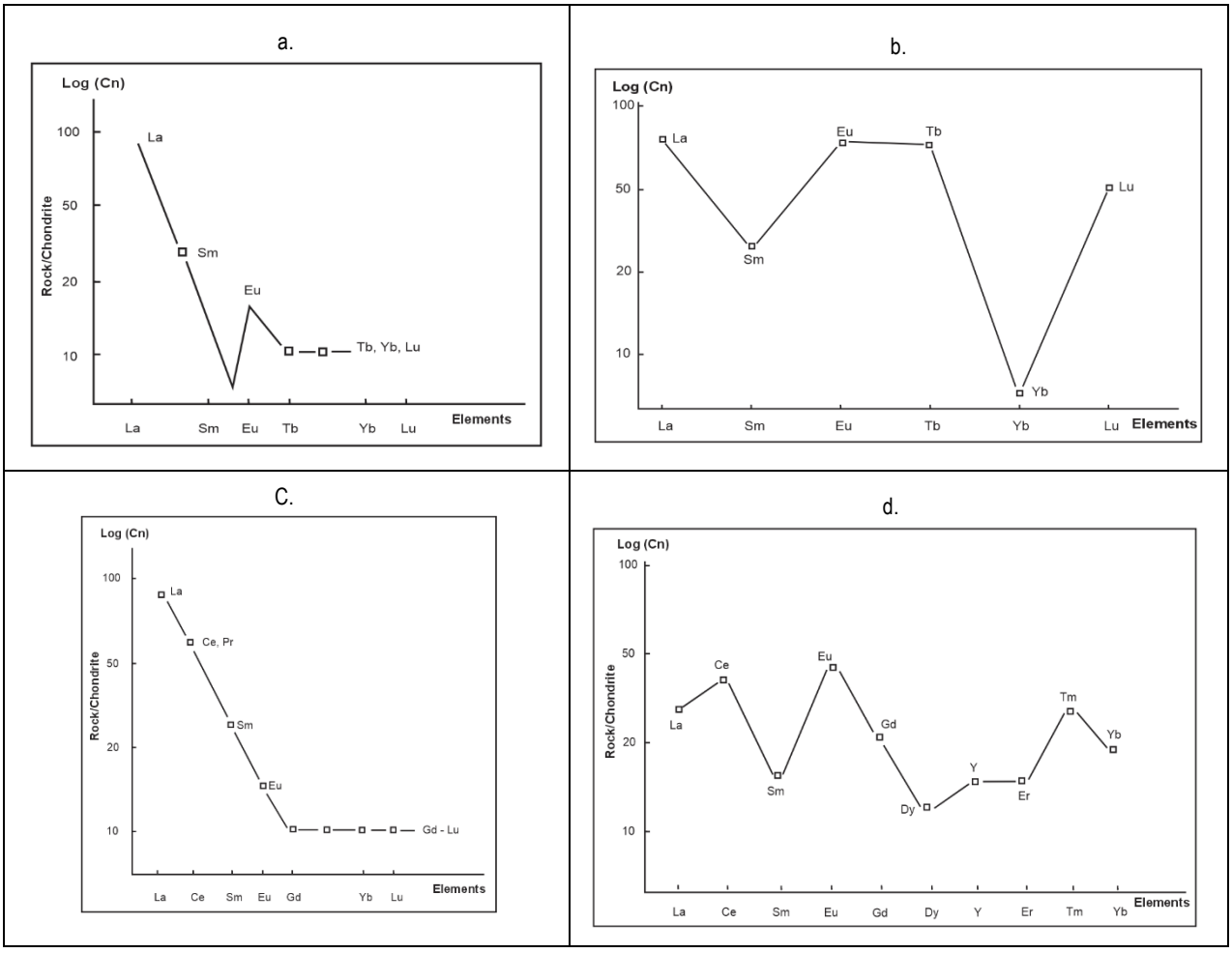


Fig. 2. Geochemical indicator of diagrams for Area I (a), Area II (b), Area III (c,d)

A prominent positive europium anomaly (Eu > Sm, Gd) represents a striking feature of this diagram (Fig. 2, d), as clastic sedimentary successions typically display flat or negative Eu anomalies. The development of this positive anomaly points to the influence of deeply circulating, hydrothermal fluids under reducing conditions, where fluid-mobile Eu^{2+} is preferentially transported and subsequently fixed into the sediment [3]. Concurrently, a positive cerium anomaly (Ce > La, Pr) indicates localized oxic conditions where Ce^{3+} oxidized to the highly insoluble Ce^{4+} state, driving its selective precipitation and accumulation in the rock. The complementary negative anomalies in Sm, Dy, and Er underscore the selective removal of specific elements from the mineralizing fluid, controlled by the unique mineral logical composition of the rock matrix [21].

Discussion and Evaluation of Results

Lanthanide fractionation reflects modifications in relative REE proportions during geological ore-forming processes. For the uranium-bearing targets evaluated here, the chondrite-normalized ratios of light to heavy lanthanides, alongside the La/Yb and Ce/Eu parameters, are critical for mapping fluid evolution and metal precipitation pathways. The diagnostic diagrams compiled for this study (Figs. 3, a-d) serve to distinguish fluid fractionation degrees, trace the selective concentration of radioactive and rare earth metals, and provide a comprehensive evaluation of regional economic potential [14].

The La/Yb bivariate plot (Fig. 3, a) represents a classic indicator for tracking REE fractionation trends [19].

Two distinct evolution paths are visible:

- **Vertical Trend (Data Groups 2 and 3):** The data arrays trend steeply upward along the La axis with minimal variation in Yb. This reveals pronounced fractionation of LREEs relative to HREEs. It points to the intensive leaching and weathering of felsic granitoids—the likely primary source of the uranium—which simultaneously liberated the companion REEs. The spatial distribution of these samples tracks fluid conduits or zones of intense metasomatic overprinting, where La concentrations increase via fluid-mediated influx.
- **Horizontal Trend (Data Group 4 - Southern Sector):** This cluster exhibits high Yb concentrations, with data points migrating laterally along the Yb axis at consistently low La values.

In contrast, the tight clustering of Data Group 1 near the origin reflects low absolute values of both La and Yb, marking host rocks that remained largely untouched by mineralizing fluids [1, 18].

The evolutionary pathways persist clearly in Figure 3, b: La/Yb vs. ∑REE variation diagram. Symbols correspond to Fig. 3, a. For the Southern sector array (Group 4), the explicit HREE enrichment reflects a material contribution from mafic basement blocks or specialized accumulation environments, likely linked to a deep-seated fault zone that promoted the active capture of heavy lanthanides. Here, the La/Yb ratio acts as a reliable geochemical fingerprint, separating fertile, ore-bearing horizons (high La/Yb) from barren or unmineralized country rocks.

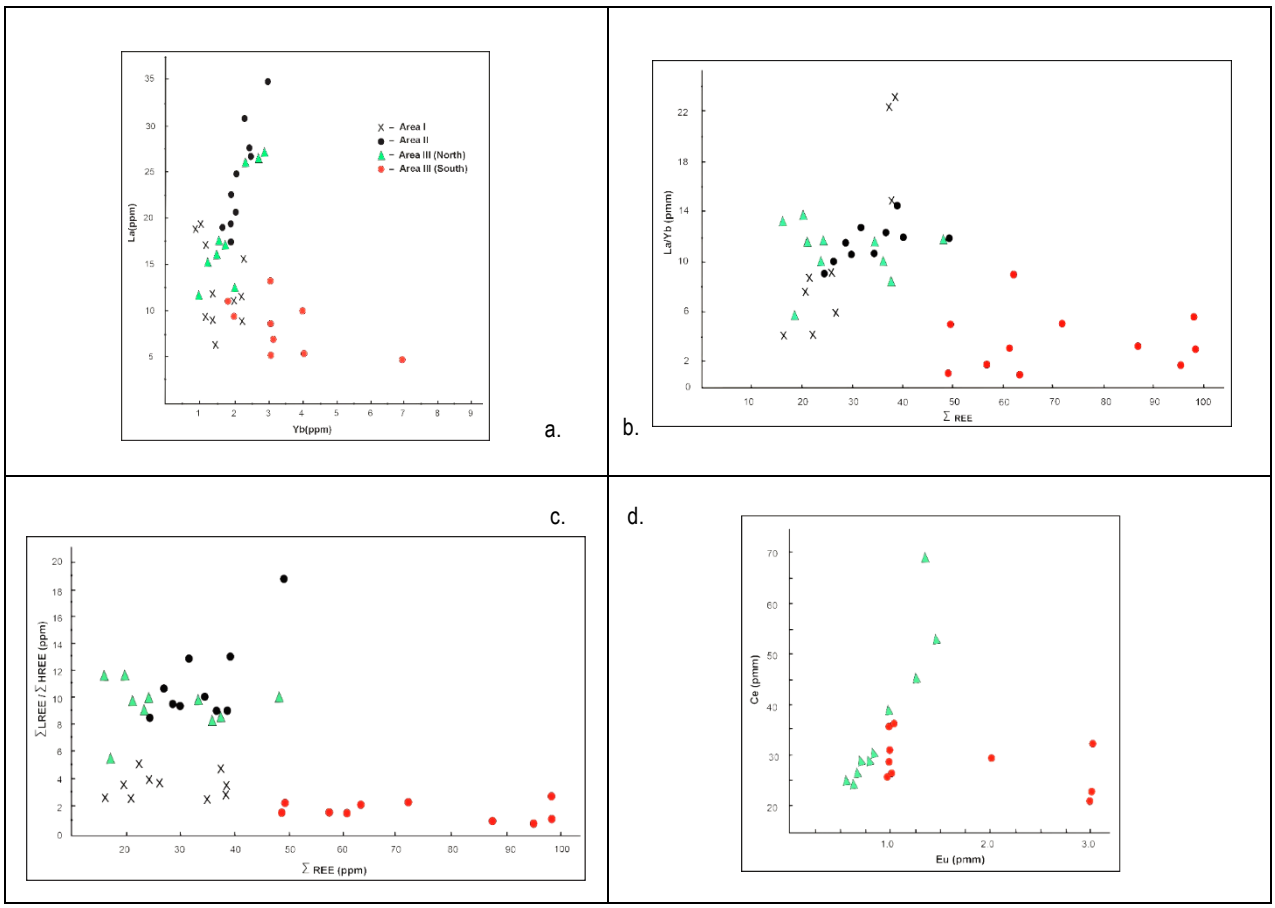


Fig. 3. Diagrams of variations REE of studied areas: 1-Area I, 2-Area II, 3-Area III (North), 4-Area III (South).

Data arrays from Areas II and Area III (Group 3) display highly elevated fractionation ratios (LREE\HREE = 8-18), confirming strong light-lanthanide enrichment within the host sequences (Fig. 3, c: ∑LREE/∑HREE vs. ∑REE variation diagram). Conversely, the Southern sector array (Group 4) highlights rocks enriched in heavy lanthanides, proving the mineralogical presence of structural accessories like garnet, zircon, xenotime, and apatite. In uranium geology, such a trend indicates the formation of a robust reducing barrier where uranium co-precipitates alongside high concentrations of heavy lanthanides. Group 1 samples remain confined to the lowest concentration domains, reflecting minimal mineralizing activity.

Europium is unique among the lanthanides due to its redox-sensitive valence transitions (Eu^{3+} \ Eu^{2+}). In this study, the pronounced Eu anomaly displayed by Group 4 (Area III, Southern sector) marks accumulation within a highly reducing zone (Fig. 3, d: Ce vs. Eu indicator diagram. Symbols correspond to Fig. 3, a). Because uranium precipitates at identical redox boundaries, these coordinates define the highest-grade zones where circulating groundwaters crossed from an oxic to an anoxic state. In sandstone-type deposits, this Eu enrichment correlates with zones rich in organic matter or biogenic bone detritus, which act as reductants that scavenge metals from solution, marking stable redox fronts with maximum ore concentration.

Rare earth elements provide an independent check on the location of geochemical barriers where uranium and companion metals precipitate [1].

Where the Eu anomaly (Group 4) features high Eu paired with low Ce concentrations, it maps out the core reduction front, allowing field geologists to draw exact operational boundaries between altered oxidized sandstones and the ore roll-front. Conversely, the Ce anomaly array (Group 3) tracks distal dispersion halos—the structural "tails" of the roll-front system—which often escape detection by standard field radiometers (Table 2).

Table 2

Comprehensive Matrix of Geochemical Exploration Indicators

Exploration Parameter	Area I	Area II	Area III (Northern Sector)	Area III (Southern Sector)
Geochemical Profile	**Sub-economic:** Low total REE (REE), poorly developed fractionation (low La/Yb and LREE/HREE).	**Granitoid-driven:** Moderate total REE, sharp escalation in the LREE/HREE ratio.	**Cerium-dominated:** High vertical dispersion along the Ce axis, high overall fractionation.	**Europium-dominated:** Maximum total REE (REE) combined with an anomalously high Eu peak.
Probable Source / Process	Pristine host sediments, largely unaltered by mineralizing fluids.	Leaching of felsic igneous rocks (granites) and black shales—the primary uranium donors.	Intensive oxidation and leaching within distal dispersion halos.	**Reducing Barrier:** Rapid co-precipitation of metals across a sharp redox boundary.
Primary Mineral Carriers	Detrital quartz and feldspars (primary framework grains).	Secondary clay matrices and accessory phases that sorb LREEs.	Iron and manganese hydroxides that actively fix oxidized Ce.	Zircon, garnet, apatite, and concentrated organic matter.
Genetic Relationship to Uranium	Barren or unmineralized country rock zones.	Feeder channels and structural conduits for ascending ore fluids within faults.	Proximal wall-rock alteration; structural "tails" of the roll-front.	**Core Ore Body:** Zones hosting maximum uranium and companion metal concentrations.
Exploration Vector (Exploration Significance)	Defines the outer boundary of the hydrothermal system.	Reliable indicator tracking proximity to the primary uranium source.	Vector indicator tracking the migration direction of paleogroundwaters.	**High-priority target zone** for resource calculation and extraction design.

Conclusions

Uzbekistan is actively advancing industrial technologies to co-extract scandium (Sc), vanadium (V), and REEs from uranium ores. The geochemical variations mapped in this study show that the concentration of valuable companion metals—particularly heavy lanthanides (Group 4)—reaches its maximum within the core reduction zones, significantly increasing the net economic value of these exploration targets.

Graphic and statistical analysis of the REE datasets demonstrates that the **Southern sector of Area III** represents the highest-priority target for mining development. Its elevated Eu and REE concentrations confirm that this sector is a highly developed geochemical accumulator. Within these mineralized zones, uranium typically occurs in easily leachable mineral forms. The abundance of companion REEs increases the commercial viability of utilizing **In-Situ Leaching (ISL)** methodologies. The tight vertical alignment of Eu values serves as a direct spa-

tial vector for tracking the core geochemical barrier (Fig. 9).

The integrated analysis of these geochemical variation plots allows us to link lanthanide behavior directly to specific ore-forming processes, providing an exploration framework for predicting and discovering hidden deposits. These diagnostic profiles distinguish primary, high-grade mineralization from weaker, secondary remobilization. For example, if the REE profile of a pitchblende/uraninite sample mirrors that of the unaltered country rock, the uranium was likely localized by modern, low-temperature groundwater circulation. Conversely, a highly divergent, fractionated REE spectrum indicates a deep-seated, high-energy fluid influx, which typically generates large-scale, commercially viable ore bodies.

References:

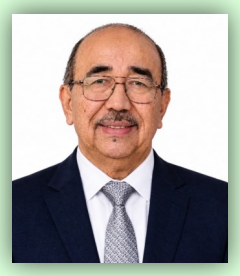
1. Ageeva EV (2022) Rare earth and radioactive elements in environmental components as indicators of ecological and geochemical environments. Extended Abstract of PhD Dissertation, Tomsk Polytechnic Institute, Tomsk, 16 p (in Russian)
2. Akhmedov MSh, Ezhkov YuB, Kholiyorov AT (2024) Prospects for the development of the raw material base of rare metals in the Republic of Uzbekistan. Proceedings of the Conference: Mineral Resource Base of High-Tech Metals. VIMS, Moscow, pp 23–30 (in Russian)
3. Bonnetti C, Cuney M, Bourlange S et al. (2017) Primary uranium signatures and REE mobility during low-temperature alteration of volcanic glass. Geochimica et Cosmochimica Acta 215:152–171. https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.08.006
4. Boynton WV (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed) Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp 63–114
5. Cuney M, Mercadier J, Bonnetti C (2022) Classification of Sandstone-Related Uranium Deposits. Journal of Earth Science 33:236–256. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1532-x
6. Dai S, Chekryzhov IYu, Seredin VV et al. (2015) Geochemical and mineralogical evidence for a coal-hosted uranium deposit in the Yili Basin, Xinjiang, northwestern China. Ore Geology Reviews 70:1–3. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.010
7. Fayek M, Janeczek J, Ewing RC (2000) Mineral chemistry and REE geochemistry of uraninite from the Oklo natural reactors and unconformity-type uranium deposits. American Mineralogist 85:28–41. https://doi.org/10.2138/am-2000-0104
8. Jin R, Teng X, Li X, Si Q, Wang W (2020) Genesis of sandstone-type uranium deposits along the northern margin of the Ordos Basin, China. Geoscience Frontiers 11:215-227. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.07.005
9. Kenzhetaev Z, Toltay B, Muzgina V et al. (2024) Assessment of Rare Earth Elements Fractionation in Sandstone and Magmatic Uranium Ores: Implications for Deposit Typing. Minerals 14:362. https://doi.org/10.3390/min14040362
10. Kyser K, Cuney M (2008) Geochemistry of Uranium Deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Series 39:1–320
11. Long Zhang, Ruizhong Hu, Biwei Chen et al. (2024) Metallogenesis of uranium deposits in China: Perspectives from uraninite chemistry. Ore Geology Reviews 173:106251. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106251
12. Martin H, Moyen JF, Rapp R (2010) The sanukitoid series: magmatism at the Archaean–Proterozoic transition. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh 100:15–33. https://doi.org/10.1017/S1755691009016120
13. McDonough WF, Sun SS (1995) The composition of the Earth. Chemical Geology 120:223–253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4
14. Mercadier J, Cuney M, Cathelineau M, Johnston D (2011) REE as tracers of uranium ore-forming processes. Chemical Geology 289:123–139. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.07.021
15. Min MZ, Chen D, Wang J (2005) Geochemical indicators of roll-front uranium mineralization in the sandstone basins of Northwest China. Acta Geochimica 24:112–124. https://doi.org/10.1007/BF02873722
16. Mirkhodjaev BI, Turesebekov AKh, Sadykova LR (2024) Geology and classification of highly complex uranium-vanadium deposits of the Central Kyzylkum. Tashkent, 165 p (in Russian)
17. Patel KS, Sharma S, Maity JP et al. (2023) Occurrence of uranium, thorium and rare earth elements in the environment: A review. Frontiers in Environmental Science 10:1058053. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058053
18. Plant JA, Saunders AD (1996) The geochemistry of uranium and its importance as a strategic resource. Journal of Geochemical Exploration 56:1–22. https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00007-6
19. Potseluev AA, Rikhvanov LP, Nikolaev SL (2011) Rare elements and gold in the deposits of the North Kazakhstan uranium ore province. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering 319:197–209 (in Russian)
20. Ruzicka V (1993) Vein uranium deposits. Ore Geology Reviews 8:247–276. https://doi.org/10.1016/0169-1368(93)90019-U
21. Seredin VV, Dai S (2012) Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. International Journal of Coal Geology 94:67–93. https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001
22. Tanaka K, Akagawa M, Asahara Y et al. (2007) Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment: its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition. Quaternary Science Reviews 26:1362–1368. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.02.004
23. Turesebekov AKh, Mirkhodjaev BI, Sharafutdinov UZ et al. (2022) Technological geochemistry and mineralogy of highly complex rare-earth ores combined in time and space – a new type of polymineral-rare metal raw materials (Uzbekistan). Proceedings of the XIV Russian Seminar on Technological Mineralogy, Moscow, pp 33-36. www.doi:10.17076/tm14_35.



Элибаев Бекзоджон Абдихаликович – Начальник отдела составления окончательных геологических отчетов и представления их в Государственную комиссию по запасам полезных ископаемых ГП «Навоийуран»
E-mail: BA.Elibayev@navoiyuran.uz
ORCID:

Bekzodjon Abdikhalikovich Elibaev – Head of the Department for Compilation of Final Geological Reports and Submission to the State Commission on Mineral Reserves, “Navoiyuran” State Enterprise
E-mail: BA.Elibayev@navoiyuran.uz
ORCID:

Elibayev Bekzodjon Abdixalikovich – «Navoiyuran» davlat korxonasining yakuniy geologik hisobotlarni tuzish va ularni Mineral zaxiralar bo‘yicha davlat komissiyasiga taqdim etish bo‘limi boshlig‘i
E-mail: BA.Elibayev@navoiyuran.uz
ORCID:



Мирходжаев Бахтияр Исмаилович – начальник тематической службы ГП «Навоийуран», доктор геолого-минералогических наук,
E-mail: BI.Mirxodjayev@navoiyuran.uz
ORCID:

Bakhtiar Ismailovich Mirkhodjaev – Head of Thematic Service, “Navoiyuran” State Enterprise, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences
E-mail: BI.Mirxodjayev@navoiyuran.uz
ORCID:

Mirxodjayev Baxtiyar Ismailovich – «Navoiyuran» davlat korxonasining tematik xizmati boshlig‘i, Geologiya va mineralogiya fanlari doktori
E-mail: BI.Mirxodjayev@navoiyuran.uz
ORCID:

НФ-1200
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОНСОЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫЙ СТАНОК



NMZ

Государственное предприятие АО НГМК
Производственное объединение
«Навоийский машиностроительный завод»
www.ngmk.uz
Адрес: г. Навои, ул. Инспекторов 5
Тел.: (+99879) 2276214; 227-64-23
Факс: (+99879) 223-48-78
E-mail: informz@ngmk.uz

УДК 622.272:622.833.5:004.942 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ЛАВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАКЛОННЫХ СБОЕК С НАДРАБАТЫВАЕМЫМИ ШТРЕКАМИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Гапеев С.Н.[1], Хакимов Ш.И.[1], Тимченко А.Н.[2]

[1]Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан
[2]Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

Аннотация. *В работе рассмотрена задача оценки напряженно-деформированного состояния геомеханической системы при переходе очистным забоем технологических наклонных сбоек и бункеров с надрабатываемыми штреками в условиях отработки угольных пластов. Объектом исследования являлись сопряжения технологических наклонных сбоек и бункеров южного полевого конвейерного штрека с коренной лавой горизонта 593 м пласта d4 Центрального блока шахтного поля ШУ «Покровское». Целью исследования являлось определение характера перераспределения напряжений в породном массиве и оценка минимально необходимой толщины породной пробки для обеспечения безопасного перехода лавой указанных сопряжений.*

Исследование выполнено методом конечных элементов в трехмерной постановке в программной среде ANSYS Workbench. При моделировании учитывались литологическое строение массива, физико-механические свойства пород и геологический индекс прочности GSI. Анализировались эквивалентные напряжения по Мизесу, а также нормальные и касательные напряжения в толще породной пробки и окружающем массиве.

Установлено, что наличие технологических наклонных сбоек приводит к формированию локальных зон концентрации напряжений в области сопряжений. Для моделей по сечениям 1-1 и 4-4 потенциально опасными являются состояния при толщине породной пробки соответственно 1,2 м и 1,0 м. При увеличении толщины пробки наблюдается снижение эквивалентных напряжений и повышение устойчивости массива. Результаты моделирования по сечениям 3-3 и 5-5 подтвердили возможность принятия типовой толщины породной пробки, равной 3,0 м, как достаточной для безопасного перехода лавой рассматриваемых сопряжений.

Ключевые слова: *угольная шахта, надработка штреков лавой, технологические наклонные сбойки, переход лавой старой выработки, напряженно-деформированное состояние, горные породы в окрестности выработки, оценка устойчивости обнажений, геомеханическая система, численное моделирование, метод конечных элементов*

KO‘MIR QATLAMLARINI QAZIB OLISH JARAYONIDA LAVA TOMONIDAN USTIDAN QAZIB O‘TILAYOTGAN SHTREKLAR BILAN TEXNOLOGIK QIYA TUTASHMALARNI KESIB O‘TISHNING MODELLASHTIRILISHI

S.N. Gapeyev[1], Sh.I. Xakimov[1], A.N.Timchenko[2]

[1]Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O’zbekiston respublikasi
[2]"Dneprovsk politexnikasi" Milliy texnika universiteti, Ukraina

Annotasiya. *Maqolada ko‘mir qatlamlarini qazib olish sharoitida lava tomonidan ustidan qazib o‘tilayotgan shtreklar bilan bog‘langan texnologik qiya sboykalar va bunkerlar kesib o‘tilganda geomekanik tizimning kuchlangan-deformatsiyalangan holatini baholash masalasi ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot obyekti sifatida “Pokrovske” Shaxtoboshqarmasi шахта maydonining Markaziy blokidagi d4 qatlami 593 m gorizontida joylashgan asosiy lava bilan janubiy maydon konveyer shtrekidagi texnologik qiya sboykalar va bunkerlarning tutashuvlari qabul qilingan. Tadqiqotning maqsadi tog‘ jinslari massivida kuchlanishlarning qayta taqsimlanish qonuniyatlarini aniqlash hamda ko‘rib chiqilgan tutashuvlarni lava tomonidan xavfsiz kesib o‘tishni ta’minlovchi jinsli tiqinning minimal zarur qalinligini baholashdan iborat bo‘lgan.*

Tadqiqot uch o‘lchamli постановкadagi chekli elementlar usuli asosida ANSYS Workbench dasturiy muhitida bajarilgan. Sonli modellashtirishda massivning litologik tuzilishi, tog‘ jinslarining fizik-mexanik xossalari hamda GSI geologik mustahkamlik indeksi hisobga olingan. Tahlil davomida Mizes bo‘yicha ekvivalent kuchlanishlar, shuningdek jinsli tiqin va uni o‘rab turgan massivdagi normal hamda urinma kuchlanishlar o‘rganilgan.

Natijalar texnologik qiya sboykalarning mavjudligi tutashuv hududida mahalliy yuqori kuchlanish zonalarining shakllanishiga olib kelishini ko‘rsatdi. 1-1 va 4-4 kesimlari uchun jinsli tiqin qalinligi mos ravishda 1,2 m va 1,0 m bo‘lganda potensial xavfli holatlar aniqlangan. Jinsli tiqin qalinligining ortishi ekvivalent kuchlanishlarning kamayishiga va massiv barqarorligining oshishiga olib keladi. 3-3 va 5-5 kesimlari bo‘yicha modellashtirish natijalari 3,0 m li tipik jinsli tiqin qalinligi ko‘rib chiqilgan tutashuvlarni lava tomonidan xavfsiz kesib o‘tish uchun yetarli ekanligini tasdiqladi.

Kalit so‘zlar: *ko‘mir shaxtasi, lavaning shtreklar ustidan o‘tishi, texnologik qiya sboykalar, lavaning eski kon lahimidan o‘tishi, kuchlangan-deformatsiyalangan holat, kon lahimi atrofidagi tog‘ jinslari, ochilmalar barqarorligini baholash, geomekanik tizim, sonli modellashtirish, chekli elementlar usuli.*

NUMERICAL MODELING OF LONGWALL CROSSING OF INCLINED TECHNOLOGICAL CROSSCUTS WITH OVERMINED GATEROADS IN COAL SEAM MINING

S.N. Hapieiev[1], Sh.I. Khakimov[1], A.N. Tymchenko[2]

[1]Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan
[2]National Technical University "Dnipro Polytechnic", Ukraine

Abstract. *The paper addresses the problem of assessing the stress-strain state of a geomechanical system during longwall face crossing of inclined technological crosscuts and bunkers connected with overmined gateroads under coal seam mining conditions. The object of the study was the junctions of inclined technological crosscuts and bunkers of the Southern Panel Belt Roadway with the main longwall face at the 593 m level of seam d4 in the Central Block of the Pokrovske Mine Field. The aim of the research was to determine the stress redistribution patterns in the rock mass and to evaluate the minimum required thickness of the rock plug ensuring safe longwall crossing of the considered junctions.*

The study was performed using the finite element method in a three-dimensional formulation in the ANSYS Workbench environment. The numerical models accounted for the lithological structure of the rock mass, physico-mechanical properties of rocks, and the Geological Strength Index (GSI). The analysis included von Mises equivalent stresses as well as normal and shear stresses within the rock plug and surrounding rock mass.

The results showed that inclined technological crosscuts lead to local stress concentration zones at the junction. For the models corresponding to sections 1-1 and 4-4, potentially hazardous conditions were identified at rock plug thicknesses of 1.2 m and 1.0 m, respectively. An increase in rock plug thickness reduced equivalent stresses and improved rock mass stability. Simulations for sections 3-3 and 5-5 confirmed that a typical rock plug thickness of 3.0 m is sufficient to ensure safe longwall crossing of the considered junctions.

Keywords: *coal mine, longwall overmining of gateroads, inclined technological crosscuts, longwall face crossing abandoned roadway, stress-strain state, roadway surrounding rocks, exposed surface stability, geomechanical system, numerical simulation, finite element method*

Введение

Добыча полезных ископаемых подземным способом всегда сопряжена с необходимостью постоянного воспроизводства рабочих мощностей, выбывающих по мере развития очистных горных работ. Для угольных шахт характерным является постоянное углубление очистной выемки, а также вовлечение в угледобычу все новых участков месторождения. Часто это связано с выполнением сложных инженерных задач, связанных, например, с переходом крупных высокоамплитудных геологических нарушений [1]. Решение такой задачи, помимо чисто технических сложностей, связанных более низкой устойчивостью пород в районе геологического нарушения, опасностями прорывов воды по сместителю нарушения и сопутствующим, необходимостью долговременного безремонтного поддержания капитальных выработок, пересекающих такое нарушение, опасностями, связанным с прохождением выработки в неустойчивых породах, связано с необходимостью крупных инвестиций, привлечением значительных ресурсов, в частности – специальных материалов для крепления капитальной выработки.

В условиях, когда требуется обеспечивать устойчиво высокий уровень добычи и при этом рационально использовать ресурсы, интерес представляет отработка ранее оставленных запасов в старых охранных целиках, участках шахтного поля, которые были оставлены по разным соображениям в уже отработанных участках. Применение такого подхода связано зачастую с тем, что рассматриваемый для доработки участок находится в зоне ранее проведенных очистных работ, в зоне возможного влияния от горных работ на этом участке находятся технологические выработки, проведенные по, вкрест простирания или по падению/восстанию пласта. Нередко такие выработки находятся на пути движения очистной выемки и тогда возникает задача перехода лавой трассы оставленной, иногда – погашенной или частично погашенной, выработки. Такие выработки могут быть как горизонтальными (например, диагональные штреки, проводимые для организации проветривания при подготовке длинных столбов), так и наклонными (например, технологические наклонные сбойки и накопительные бункеры, проводимые с нижележащего горизонта для оптимизации логистики полезного ископаемого). В этом случае меры по управлению горным давлением в очистном забое должны включать дополнительные мероприятия по поддержанию неустойчивой кровли или укреплению ослабленной почвы на участке пересечения лавы и выработки.

Такая ситуация имела место в Центральном блоке шахтного поля Шахтоуправления (ШУ) «Покровское» (Украина) при подготовке к отработке запасов коренной лавы горизонта 593 м пласта d4. Планом развития горных работ коренной лавы (рис. 1) предусматривается надработка нижележащих капитальных выработок – южного полевого конвейерного (ЮПКШ) и южного полевого откаточного (ЮПОШ) штреков. При этом из ЮПКШ на уровень коренной лавы ранее были проведены наклонные технологические сбойки и вертикальные накопительные бункеры, формирующие перегрузочные пункты (рис. 2). По мере движения лавы предусматривались переходы лавой сопряжений с этими выработками, таких пересечений согласно плану горных работ (рис. 1) должно было быть семь (сечения от 1-1 до 7-7).

Анализ мирового опыта решения задачи пересечение (перехода) лавой брошенных выработок показывает, что инженерная практика предусматривает предварительную оценку рисков и возможных последствий с целью разработки соответствующих мероприятий по недопущению аварийных ситуаций в процессе реализации задачи или проверки уже разработанных решений с целью оценки их параметров и их соответствия развитию геомеханической ситуации по мере переезда лавой брошенной выработки. Часто такие прогнозы осуществляются на основе анализа результатов численного моделирования ситуации. Так, в работе [2] авторы исследуют закономерностей распределения опорного давления при прохождении очистным забоем заброшенных горных выработок в условиях подземной угледобычи и определение характера изменения напряжений в зависимости от расстояния между лавой и старой выработкой. Авторы рассматривают проблему повышения горного давления и ухудшения условий поддержания массива при пересечении ранее пройденных выработок. Метод исследова-

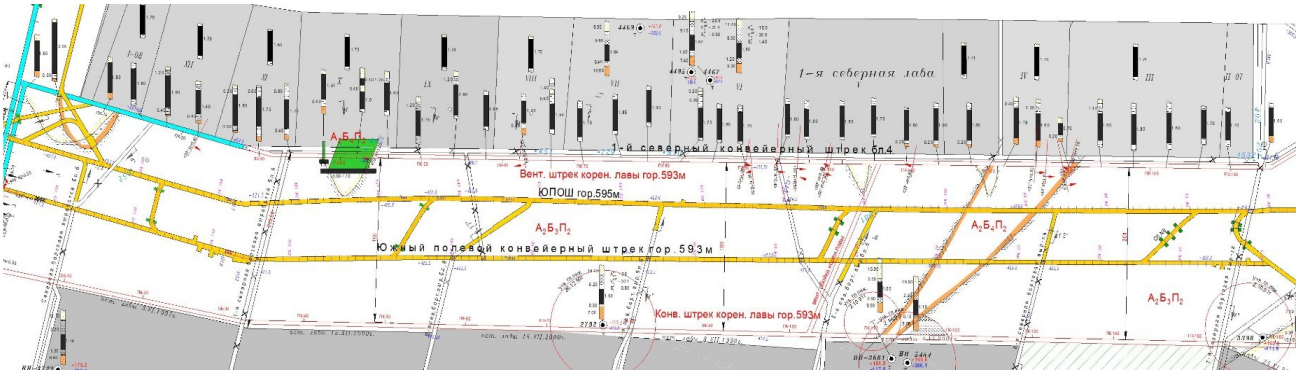


Рис. 1. Выкопировка из плана горных работ в районе коренной лавы гор. 593 м пласта d_4 Центрального блока шахтного поля ШУ «Покровское»

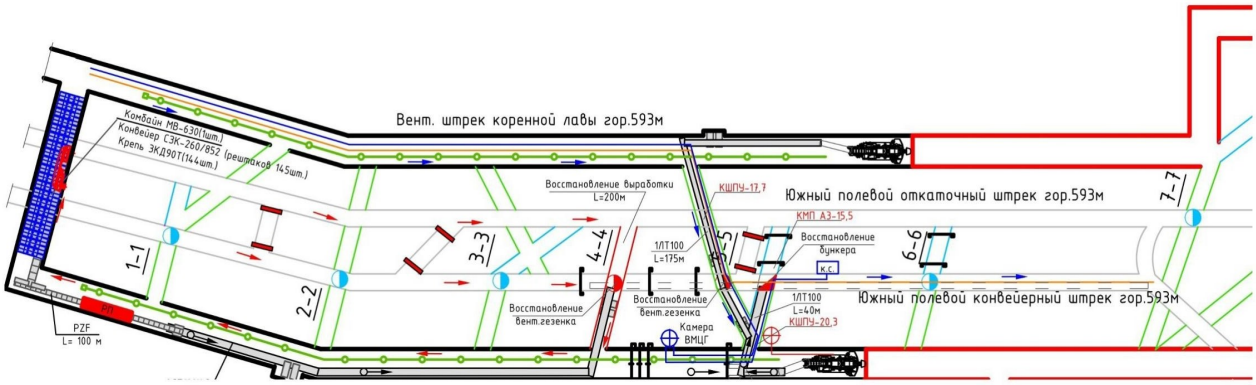


Рис. 2. Положение технологических наклонных сбоек и бункеров ЮПКШ по трассе коренной лавы гор. 593 м пласта d_4 (сечения 1-1 – 7-7)

ния включает теоретический анализ и численное моделирование распределения опорного давления в массиве пород. Анализировалось распределение вертикальных напряжений впереди очистного забоя и изменение положения зоны максимального опорного давления. Авторы делают вывод, что наличие заброшенной выработки существенно изменяет распределение опорного давления в массиве пород при ведении очистных работ.

Целью статьи [3] являлось исследование механизма деформации и разрушения окружающих пород при прохождении очистным забоем заброшенных выработок, а также разработка технологии управления состоянием массива и крепления для обеспечения безопасного ведения очистных работ. В качестве объекта рассмотрен участок 1305 шахты Juji Coal Mine, где очистной забой пересекает несколько заброшенных выработок. Основные результаты показывают, что при подходе лавы к заброшенной выработке происходит концентрация напряжений и увеличение деформаций кровли, особенно вблизи ключевого блока пород. Численное моделирование подтвердило, что без специальных мер поддержания возможно значительное разрушение окружающих пород и потеря устойчивости. Авторы делают вывод, что ключевым фактором устойчивости является контроль поведения основной кровли и формирование рациональной схемы поддержания в зоне пересечения.

Закономерности изменения напряженного состояния массива и глубины повреждения почвы при прохождении смежных очистных забоев через заброшенную выработку исследовались в статье [4], где авторами рассматривается влияние как первой, так и второй рабочей панели на состояние массива. Анализировались распределение вертикальных напряжений, формирование зон концентрации напряжений и глубина разрушения пород почвы вблизи старой выработки. Численное моделирование показало, что максимальные значения напряжений и глубина повреждения возникают в зоне влияния старой выработки и зависят от положения очистного забоя относительно нее. Авторы отмечают, что развитие повреждений почвы связано с изменением траектории передачи нагрузки и концентрацией напряжений в зоне пересечения. Авторы статьи, как и другие исследователи [2, 3] делают вывод о том, что брошенная выработка существенно влияет на эволюцию напряжений при развитии горных работ и условия обеспечения устойчивости геомеханических систем «лава-брошенная выработка-углевмещающий массив».

Подобные выводы также сделаны и авторами других близких к тематике статьи исследований [5-8] – все научные коллективы сходятся в выводах, что присутствие в рассматриваемых условиях брошенных горных выработок существенно ухудшает ситуацию поддержания кровли лавы при переходе такой выработки.

Все авторские коллективы, результаты исследований которых приведены выше, в качестве основного метода исследований показывают численные методы оценки напряженно-деформированного состояния геомеханических систем. В мировой практике решения подобных задач имеется достаточное количе-

ство работ, которые указывают на обоснованность применения численных методов, в частности – метода конечных элементов.

Применение метода конечных элементов для решения сложных задач по влиянию горных работ на условия поддержания трехлучевых сопряжений горных выработок показано в работе [9]. Авторы численно решают задачу получения картины изменения напряженно-деформированного состояния геомеханической системы «лава-сопряжение-породный массив» и делают вывод, что полученные ими результаты численного моделирования могут служить основанием для разработки эффективных инженерно-технологических решений по обеспечению устойчивости сопряжений при воздействии очистных работ. Инженерные решения на основе численных исследований продемонстрированы также и в, например, работах [5, 7, 8, 10-13].

Таким образом, анализ приведенных работ показывает, что при проектировании мероприятий по переходу лавой брошенных выработок численное моделирование с целью оценки изменения НДС геомеханической системы «лава-брошенная выработка-породный массив» является стандартной практикой, которая используется повсеместно. Вместе с тем можно сделать вывод, что подобные геотехнические ситуации всегда уникальны, поскольку на устойчивость породных обнажений и изменение НДС геомеханических систем всегда оказывает влияние уникальные горно-геологические и горнотехнические факторы несмотря на то, что формально их набор всегда схож. Из этого следует, что для оценки НДС каждого конкретного горнотехнического объекта численный анализ должен проводиться для каждой геомеханической ситуации на каждом таком отдельно взятом горнотехническом объекте.

В этой связи целью выполнения работы являлось определение методами численного анализа характера изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива и оценка размеров опасного сечения сопряжения технологических наклонных сбоек и бункеров ЮПКШ с призабойной частью коренной лавы гор. 593 м при проходе последней над данными сопряжениями. Результаты моделирования являются основанием для оценки объемов работ по закладке технологических наклонных сбоек для обеспечения безопасного и надежного перехода коренной лавой указанных сопряжений.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

– выполнен анализ условий, которые складываются при переходе лавой каждого сопряжения, что позволило выделить наиболее опасные сечения с точки зрения тяжести последствий их неудачного перехода лавой;

– сформирован набор исходных данных для моделирования, созданы 3D-модели наиболее опасных сечений, проведена их калибровка;

– методом конечных элементов выполнен расчет каждого наиболее опасного сечения и установлены картины распределения НДС;

– выполнен анализ результатов моделирования и установлены величины минимально необходимого объема заполнения наклонных технологических сбоек на участке подхода к ним забоя коренной лавы.

Методы.

Для оценки напряженно-деформированного состояния участка углепородного массива, ослабленного комплексом горных выработок, принят метод конечных элементов в 3D-постановке. Расчеты выполнялись в интегрированной программной среде для инженерного моделирования и численного анализа ANSYS Workbench. Параметры расчетных моделей представлены в (табл. 1), при этом в расчет брались только те сечения, на которых присутствовали наклонные технологический сбойки, то есть сечения 2-2 и 7-7 (см. рис. 2) не моделировались. Расчетная область двух выполненных моделей включала штреки коренной лавы, технологические наклонные сбойки, бункеры, ЮПКШ, ЮПОШ. В ряде случаев состав объектов, попадающих в расчетную область, корректировался и из нее исключались некоторые объекты для упрощения модели и уменьшения числа конечных элементов в сетке, и как следствие – времени расчета.

Таблица 1

Характеристики моделей в среде Ansys Workbench

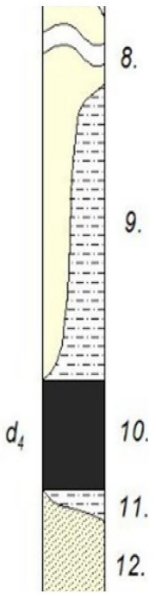
Наименование	**Модель №1** (сечение 1-1)	**Модель №2** (сечение 3-3)	**Модель №3** (сечение 4-4)	**Модель №4** (сечение 5-5)
Размер модели (B×H×L), м	100×200×300	100×75×220	100×75×220	100×75×220
Расстояние от краев до значимой расчетной области, м	75,0	25,0	25,0	25,0
Размеры зоны сгущения конечных элементов, м	Шар диаметром 40 м	Шар диаметром 40 м	Шар диаметром 40 м	Шар диаметром 40 м
Тип конечного элемента, Количество конечных элементов	Тип –Tet10, 31736	Тип – Tet10, 78266	Тип – Tet10, 78266	Тип – Tet10, 78266
Средний размер стороны конечного элемента, м	22 м – для крупных; 1 м – для сгущенных	15 м – для крупных; 1 м – для сгущенных	15 м – для крупных; 1 м – для сгущенных	15 м – для крупных; 1 м – для сгущенных
Нагрузка на модель γH, МПа	13,54	13,54	13,54	13,54
Нагрузка от оборудования, МПа	2,2	2,2	2,2	2,2
Нагрузка от оборудования на площади окна сопряжения, т	12,53	12,03	12,03	12,03

Примечание: сопряжение по сечениям 2-2 и 7-7 не моделируются в связи с отсутствием технологической наклонной сбойки в сечениях

Таблица 2

Физико-механические свойства моделируемых горных пород

№	Название характеристики	Уголь	Алевролит	Песчаник
1	Модуль Юнга, МПа	2100	5300	11000
2	Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,26
3	Прочность на сжатие, МПа	15,0	46,0	70,0
4	Объемный вес пород, кН/м³	23,0	25,0	25,0



№ п.п.	Нормальная мощность, м	Описание вмещающих пород	По данным детальной разведки 1974 г.							
			Влажность первичная, %	плотность, т/м³		Пористость, %	Предел прочности 10^7Па			Коэфф-т крепости
				кажущаяся	действительная		на сжатие		на разрыв параллельн.	
							в естест. состоянии	после водонасыщ.		
8.	7.60-16.10	**Песчаник** - кварцевый, мелкозернистый, местами тонкозернистый, серый, слюдистый, с прожилками угля, кварцевый, крепкий, твердый.	2,52-2,55	2,52-2,65	2,60-2,70	8,50-12,55	613-840	526-555	52	-
9.	0.00-9.80	**Алевролит** - серый, скрытослоистый, с ровным и неровным изломом, с отпечатками флоры, средней твердости.	0,60	2,56-2,58	2,60-2,70	-	336-535	238	62	0.40
10.	1.65-1.90	**Уголь d_4** - черный, матовый, листоват с тонкими прослоями сланца глинистого, с примазками фюзена, средней крепости.	-	1.30	1.34	-	100-150	-	-	-
11.	0.00-1.00	**Алевролит** - в верхней части слоя кучерявчик, темносерый, комковатый, с отпечатками обуглившейся флоры, со слюдой, средней твердости.	1,01-1,48	2,62-2,72	2,69-2,74	-	420-518	213-320	-	1,51-3,12
12.	7.60-13.50	**Песчаник** - мелкозернистый, серый, кварцевый, со слюдой, с прожилками угля, крепкий, средней твердости и твердый.	2,50-2,53	2,50-2,66	2,62-2,73	8,51-12,50	670-790	523-615	53	1,71-4,74

Рис. 3. Данные литологической колонки по пласту d_4

Модель выполнена послойной, последовательность слоев соответствует литологической колонке на участке моделирования. Физико-механические свойства слоев, задаваемых в модели, соответствуют свойствам, указанным для рассматриваемой геологической толщи в прогнозном геологическом разрезе (табл. 2, рис. 3).

Критерием прочности принят обобщенный критерий Хука-Брауна как наиболее апробированный в мировой практике моделирования из доступных геомеханических критериев, имеющихся в распоряжении исследователя в среде ANSYS Workbench. При этом обобщенный критерий Хока-Брауна имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + s \right)^a \qquad (1)$$

Здесь σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, Rc – среднее значение предела прочности на одноосное сжатие породных образцов. Отличие заключатся в появлении новых параметров: mb и a, которые определяются через принятый для данных пород геологический индекс прочности GSI (Geological Strength Index), учитывающего геологические особенности породного массива, в частности, его структуру и наличие трещин (5 ≤ GSI ≤ 100). Значения геологического индекса прочности выбираются в соответствии с классификацией, разработанной Э. Хоком и Д. Брауном [14] (рис. 4) на основе визуального обследования пород в естественных условиях и данных, предоставленных геологической службой шахты. Учет структурной неоднородности пород, которая приводит к снижению прочности материала слоя в массиве в сравнении с показателями лабораторных испытаний принят по результатам анализа геологического описания из паспорта подготовки коренной лавы гор. 593 м, а также из рабочей документации участкового геолога шахты.

Введение в расчет индекса GSI корректирует все механические характеристики пород в зависимости от их структуры и степени нарушенности.

Константа m_b, определяющая генезис пород, корректируется следующим образом:

$$m_b = m_i \, exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \qquad (2)$$

Величины s и a (параметры аппроксимации огибающей кругов напряжений при испытании образцов) также определяются в зависимости от геологической характеристики пород. Для породного массива «хорошего» качества (GSI > 25) имеем:

$$s = exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right), a = 0{,}5 \qquad (3)$$

Для породного массива «плохого» качества (GSI < 25):

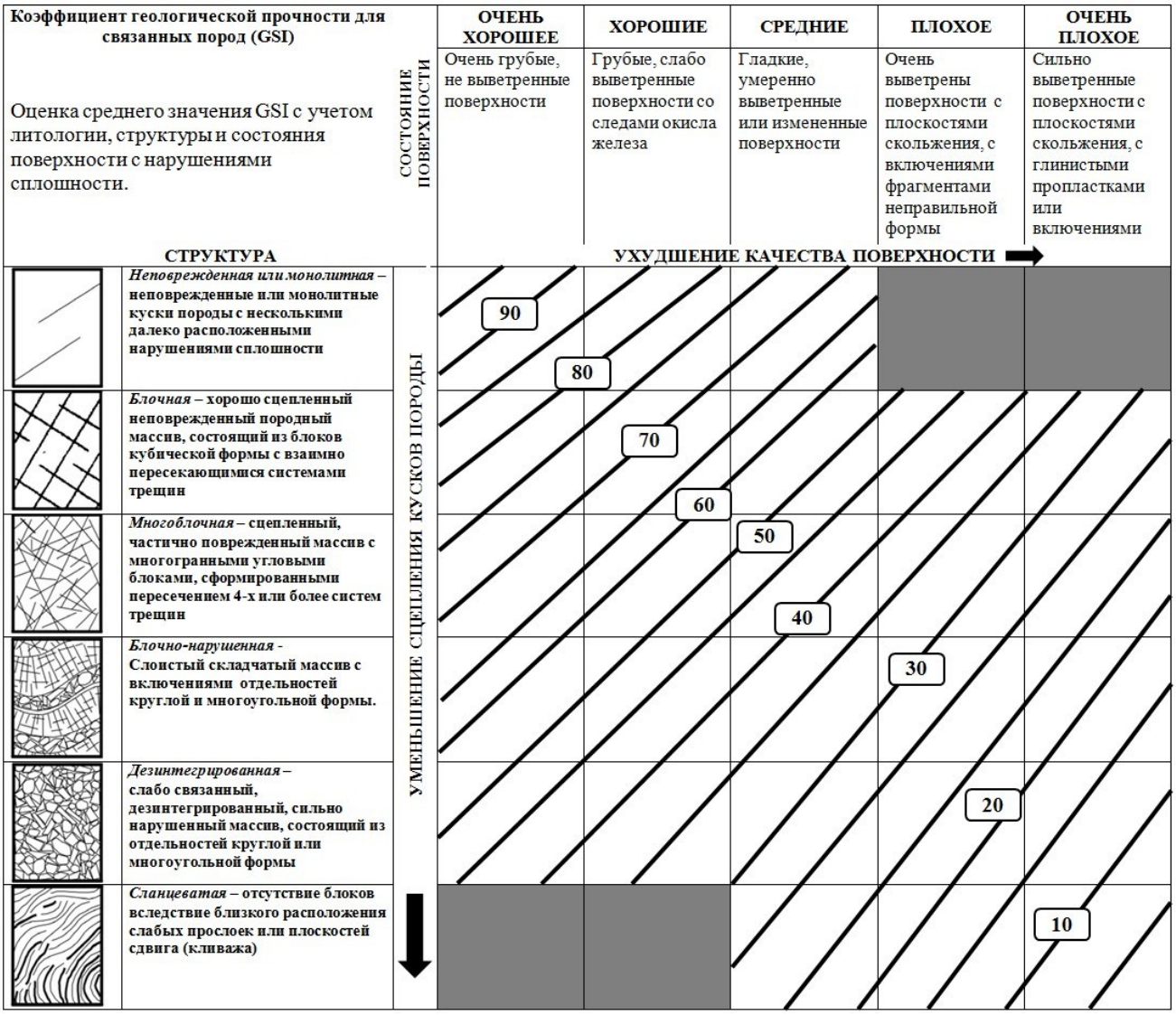


Рис. 4. Классификация пород на основе геологического индекса прочности GSI [14]

$$s = 0, a = 0{,}65 - \frac{GSI}{200} \qquad (4)$$

Параметры для расчета, которые отсутствовали в прогнозном геологическом разрезе, принимались из доступных технических справочников, содержащих сведения о свойствах горных пород шахтных полей Центрального Донбасса Украины.

Задачи решались в статической постановке в режиме «нелинейная упругость», т.е. динамика продвижения комплекса в лаве, периодические «топтания» механизированной крепи при снятии и приложении распорных усилий в задаче не учитывались. Однако эти факторы учитывались в приложенной к модели нагрузке как коэффициент пригрузки, равный 1,2, как это требуют нормативные требования при расчете устойчивости обнажений (согласно украинскому отраслевому стандарту СОУ 10.1.00185790.011:2007. Подготовительные выработки на пологих пластах. Выбор крепления, способов и средств охраны, 2007 г.).

Результатами расчета, которые подвергались анализу, являлись напряжения в теле «языка» сопряжения и окружающем его массиве (нормальные вертикальные, касательные, и эквивалентные по Мизесу). Анализировалась качественная картина изменения напряженного состояния и количественные величины напряжений. При этом принималось во внимание, что если изополя напряжений в массиве вокруг технологической наклонной сбойки и лавы смыкались, то такое сечение рассматривалось как вероятно опасное, по которому возможен пролом «языка» сопряжения при воздействии сверху нагрузки от механизированной крепи лавы при ее проходе над сопряжением.

Моделирование сечений без наклонных сбоек (сечения 2-2 и 7 -7) выполнять нецелесообразно, так как отсутствует ситуация, поставленная в задачу моделирования.

В процессе подготовки статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта (ИИ) на базе большой языковой модели OpenAI ChatGPT. ИИ применялся исключительно

как вспомогательный инструмент научно-информационной и редакционной поддержки и не использовался для генерации оригинальных научных результатов, интерпретации расчетов или формулирования выводов исследования. С использованием ChatGPT выполнялись следующие задачи:

– подбор и предварительный поиск научных публикаций по тематике численного моделирования геомеханических процессов при подземной разработке пластовых месторождений;

– уточнение англоязычной и русскоязычной горнотехнической терминологии;

– перевод терминов, названий рисунков и подрисуночных подписей;

– языковое и стилистическое редактирование отдельных фрагментов текста;

– проверка корректности оформления библиографических описаний и ссылок в различных стилях цитирования;

– помощь в структурировании материалов статьи.

Все сведения, полученные с использованием ИИ, дополнительно проверялись авторами по первоисточникам, нормативным документам и научным публикациям. Генеративный ИИ не рассматривался как соавтор публикации и не принимал самостоятельных решений относительно научного содержания работы. Окончательная редакция текста, интерпретация результатов исследования и ответственность за содержание статьи полностью принадлежат авторам.

Результаты

Моделировалась ситуация нахождения комплекса непосредственно над сопряжением с бункерами и технологическим наклонными сбойками. Граничные условия, принятые при моделировании:

А) Нижняя грань модели – запрет перемещений по осям X, Y, Z;

Б) Боковые грани модели – запрет перемещений X, Z; разрешены перемещения по Y;

В) Верхняя грань модели – равномерно-распределенная нагрузка от вышележащей толщи, равная 13,54 МПа;

Г) Поверхность почвы лавы у забоя (в выработках по пласту, которые пересекаются лавой) – равномерно распределенная нагрузка от давления распертых секций на почву (согласно параметрам механизированной крепи лавы) и вес технологического оборудования – суммарно 2,2 МПа. С учетом конструкции узла опирания (*рис. 5*) настила из двутавра и СВП-33 над устьем бункеров и технологических сбоек, которая предусматривает опирание с одной из сторон на перемычку в наклонной сбойке, которая затем передает нагрузку на материал заполнения сбоек, пространство устья сбойки на модели оставалось без приложения нагрузки, но по периметру сопряжения на уровне почвы пласта прикладывалась распределенная сила, величина которой принималась в зависимости от размера окна сопряжения и величины нагрузки от мехкомплекса (см. *табл. 2*).

Модель аппроксимировалась конечно-элементной сеткой из конечных элементов-тетраэдров, общее количество которых представлено в (*табл. 2*). На (*рис. 6*) представлены общие виды численных моделей для сечений 1-1 и 4-4 с разделением на слои. Подготовка геометрии осуществлялась среде Autodesk AutoCAD, после чего готовая геометрия расчетной области передавалась в интегрированную среду ANSYS Workbench, где уже осуществлялась подготовка модели для непосредственно конечноэлементного анализа. Задача решалась для наиболее неблагоприятных условий, когда полости технологических наклонных сбоек и бункеров свободны от крепи и ничем не заполнены (*рис. 7*). Для сокращения времени счета, а также получения более точных результатов, сетка модели оптимизировалась по результатам пробных расчетов (*рис. 8 и 9*). В итоге окончательно принята сетка разной густоты. Размеры элементов в областях с различной густотой сетки приведены в (*табл. 2*).

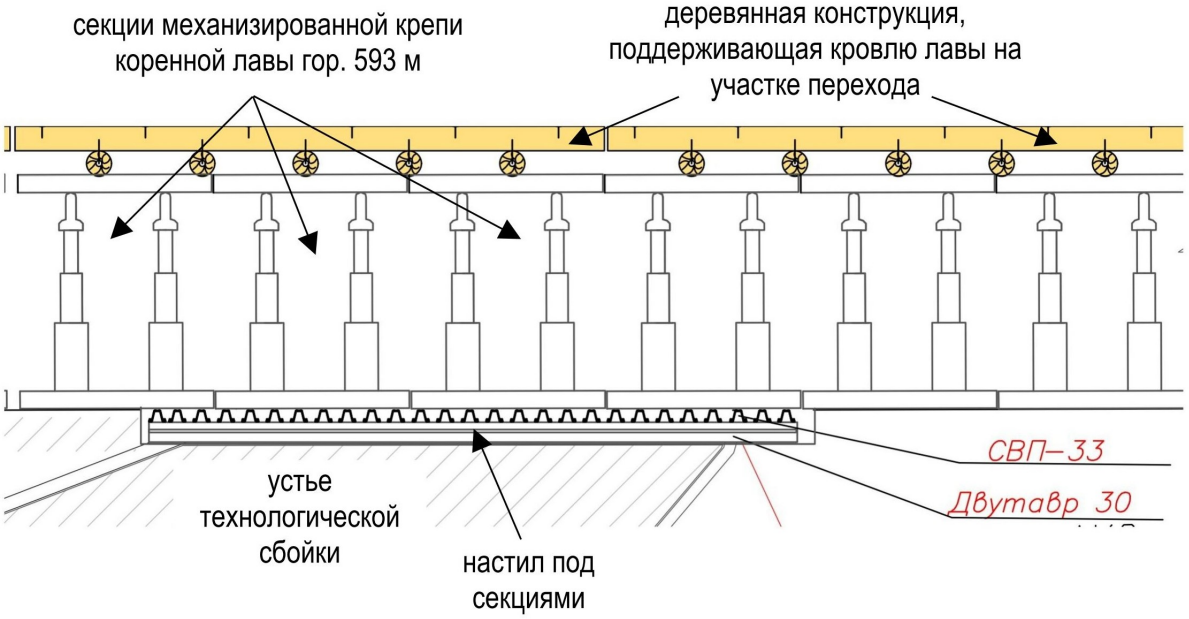
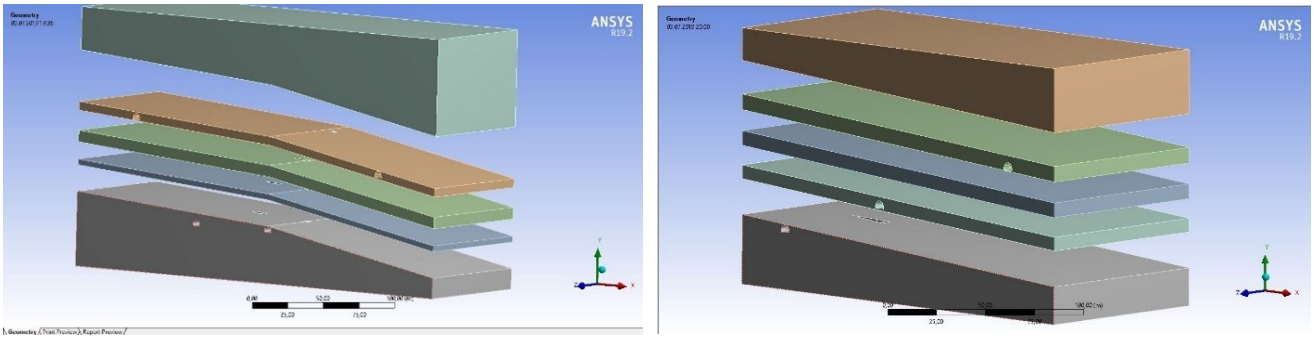


Рис. 5. Принятая проектом подготовки коренной лавы 593 м конструкция узла перехода устья наклонной сбойки



а) б)

Рис.6. Общие виды моделей с разделением на слои: а) для модели по сечению 1-1; б) для модели по сечению 4-4

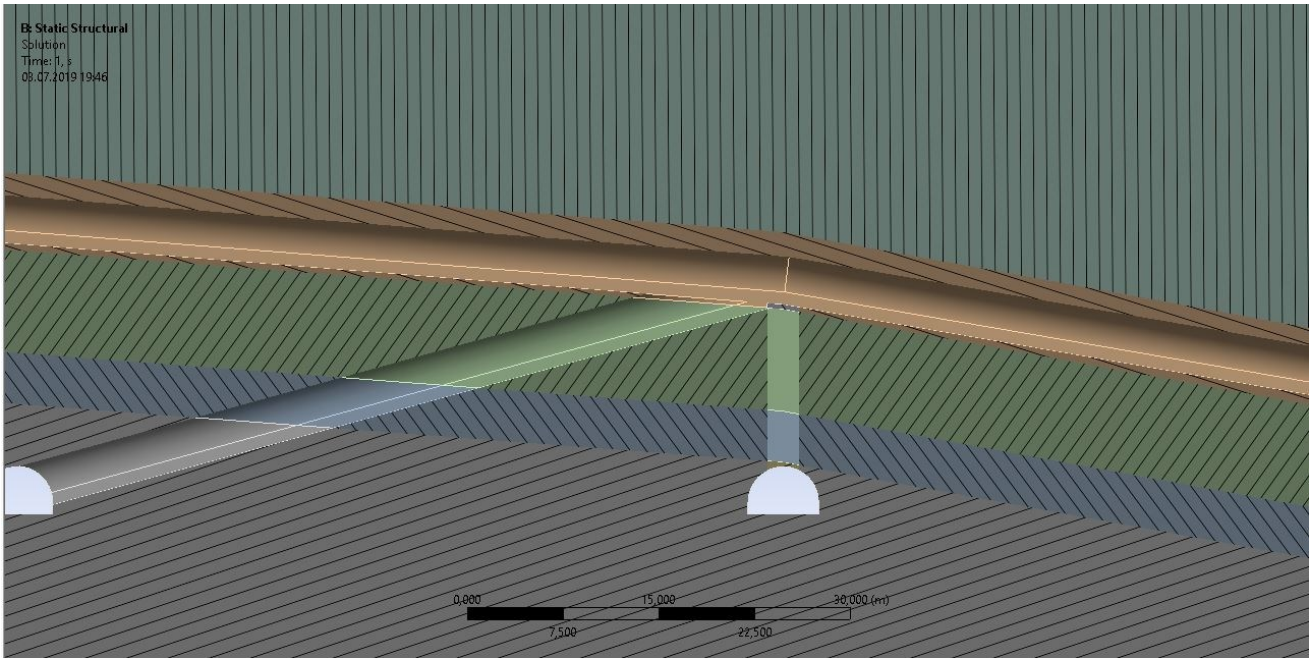
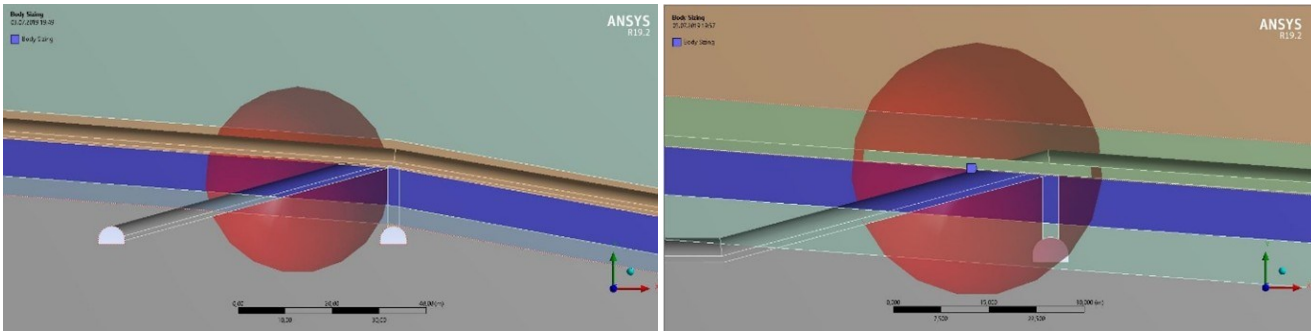


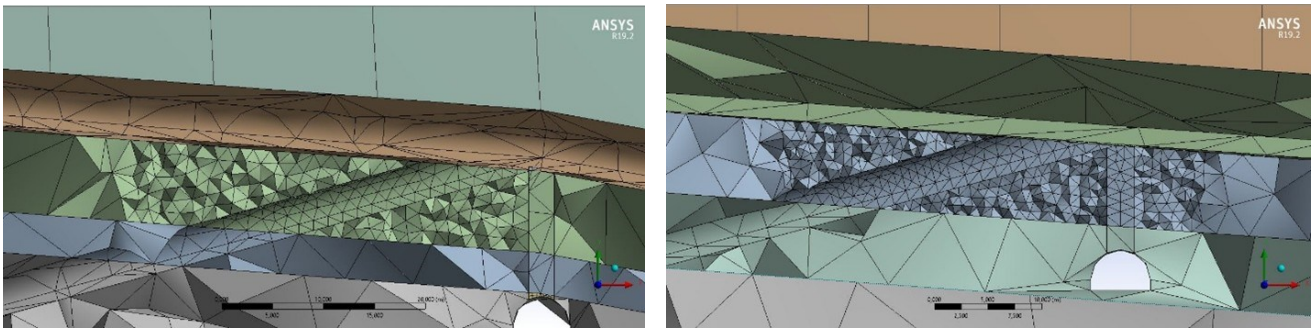
Рис. 7. Пример модели с незаполненными выработками (часть численной модели): а – «язык» сопряжения, опасный к провалива-нию оборудования в наклонную технологическую сбойку

На рис.8 представлены примеры шаров сгущения сетки конечноэлементных моделей и их расположение в моделях по сечениям 1-1 и 4 -4, а на рис. 9 – результат проведенного сгущения сетки.



а) б)

Рис. 8. Шар сгущения сетки конечноэлементных моделей: а) в модели по сечению 1-1; б) по сечению 4-4



а) б)

Рис. 9. Сетка конечных элементов после сгущения: а) для модели по сечению 1-1; б) для модели по сечению 4-4

Качественные и количественные результаты расчетов модели сопряжения по сечению 1-1. На (*рис. 10 и 11, а-г*) представлено сечение, при котором изополя повышенных напряжений смыкаются в толще «языка» сопряжения, что квалифицируется как потенциально опасное сечение. Высота породной пробки при этом составляет 1,2 м. При удалении от сопряжения по наклонной сбойке (при увеличении толщины породной пробки) абсолютные величины эквивалентных напряжений снижаются: если на «опасном сечении» средняя величина напряжений составляет порядка 10 МПа. На расстоянии, равном толщине породной пробки 3,0 м, средние значения эквивалентных напряжений снижаются до величин порядка 3 МПа. При этом в кровле наклонной сбойки (*рис. 11, б*) наблюдается повышение нормальных вертикальных напряжений на длине 20 м, однако по абсолютной величине это повышение невелико – в среднем менее 1 МПа. В сечении с толщиной пробки 1,0 м величины этих напряжений составляют от -5,9 МПа в верхней части «языка» до +0,24 Мпа в нижней. При этом имеет место перемена знака действующих напряжений, что указывает на появление изгибных явлений в этом сечении.

Сравнительно малыми являются касательные напряжения (*рис. 11, в*) в толще «языка» сопряжения – от -0,11 МПа в верней части «языка» до -0,63 МПа в нижней его части. Их значения не превышают 15% от разрушающих.

Картина нормальных вертикальных напряжений (*рис. 11, г*) указывает также на появление повышенных напряжений в «языке» при действии нагрузки. Их величины в сечении при толщине пробки 1,0 м составляют от -2,9 МПа до – 1,8 МПа соответственно в верхней и нижней частях языка.

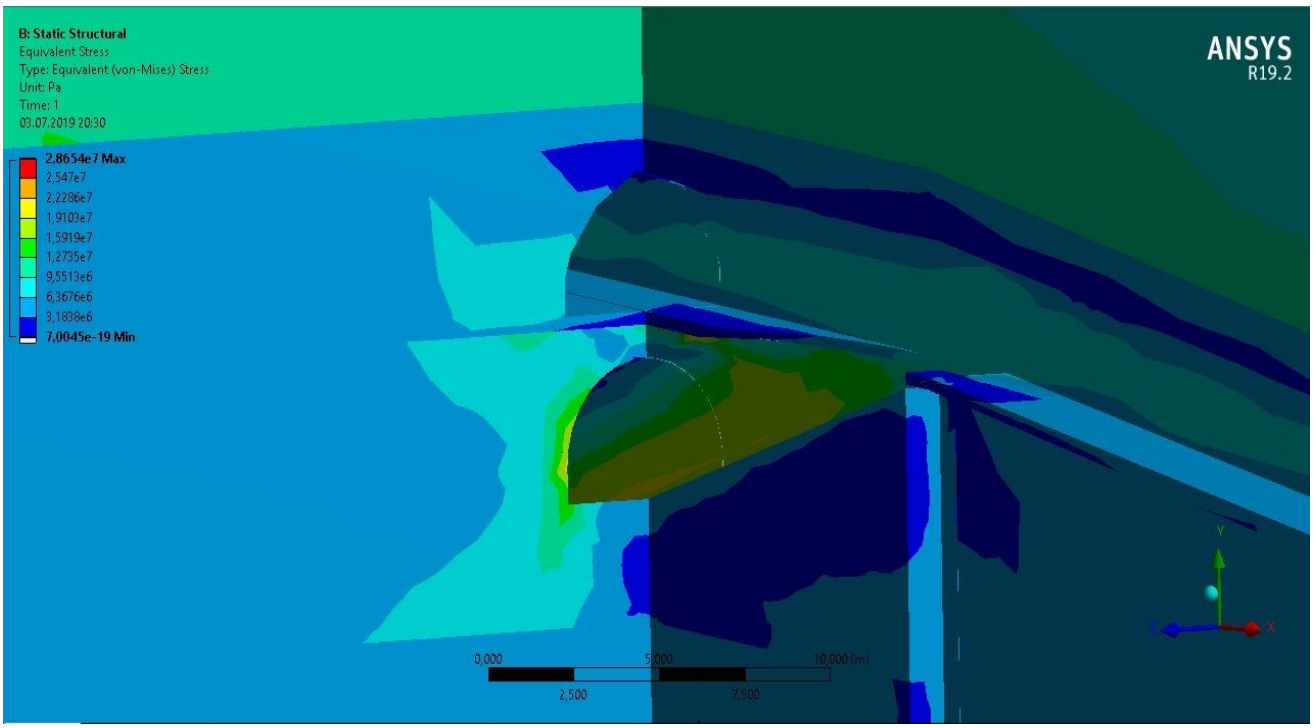


Рис. 10. Сопряжение по сечению 1-1. 3D-сечение с картиной распределения изополей эквивалентных напряжений по Мизесу в толще массива, окружающего сопряжения

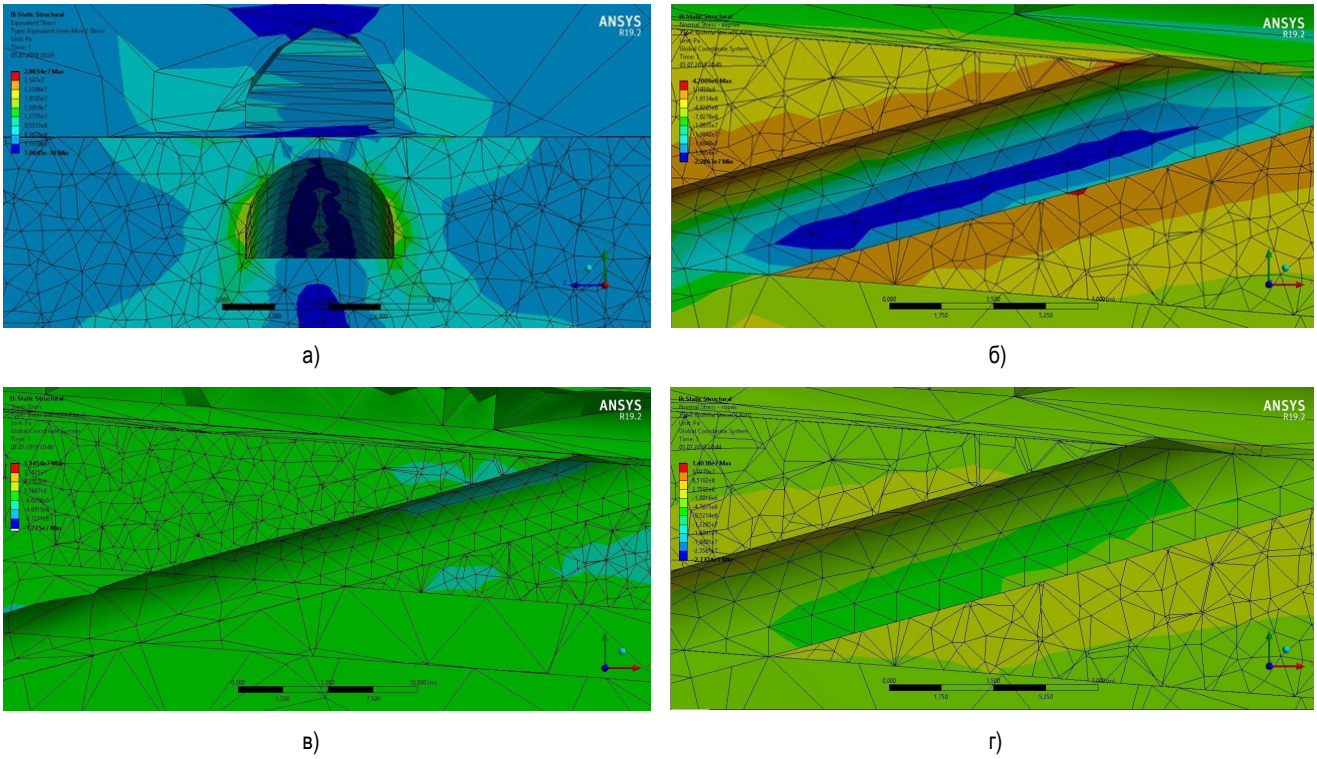


Рис. 11. Сопряжение по сечению 1-1. Картины распределения напряжений в толще породной пробки сопряжения: (а) плоское сечение картины эквивалентных напряжений; (б) нормальные вертикальные напряжения; (в) касательные напряжения; (г) нормальные горизонтальные напряжения

Таким образом, в целом результаты моделирования показывают, что потенциально опасной с точки зрения продавливания оборудования в наклонную сбойку через породную пробку в ее толще является сечение при толщине породной пробки, равной 1,2 м.

Качественные и количественные результаты расчетов модели сопряжения по сечению 4-4. Картины распределения напряжений в толще «языка» сопряжения для модели по сечению 4-4 представлены ниже, на (*рис. 12 и 13,а-г*). При этом общая качественная картина в целом повторяет предыдущую ситуацию – имеется сечение при толщине породной пробки в кровле наклонной сбойки, равной 1,0 м, которое также можно характеризовать как потенциально опасное. По абсолютным значениям средние величины напряжений в модели достигают следующих значений:

– эквивалентные (*рис. 12 и 13, а*) – до 9,5 МПа. При удалении от сопряжения по наклонной сбойке (при увеличении толщины породной пробки) абсолютные величины эквивалентных напряжений снижаются: на расстоянии, равном толщине породной пробки 3,0 м, средние значения эквивалентных напряжений снижаются до величин порядка 4 МПа.

– нормальные вертикальные (*рис. 13, б*) – от -3,99 МПа до +0,44 МПа (смена знака);

– касательные (*рис. 13, в*) – от -0,154 МПа до -0,03 МПа;

– нормальные горизонтальные (*рис. 13, г*) – от -0,23 МПа до +3,6 МПа (смена знака!)

Таким образом, в целом результаты моделирования показывают, что потенциально опасной с точки зрения продавливания оборудования в наклонную сбойку через породную пробку в ее толще является сечение при толщине породной пробки, равной 1,0 м.

Выполненные расчеты моделей для сопряжений бункеров и наклонных сбоек (сечения 1-1 и 4-4) показывают, что перераспределение напряжений в теле «языка» сопряжений в обоих моделях происходят качественно одинаково: формируется такая картина распределения эквивалентных напряжений, при которой можно выделить потенциально опасные сечения в толще «языка» сопряжения – при величине толщины породной пробки в кровле наклонной технологической сбойки, равной 1,2 м и 1,0 м для моделей сечения соответственно 1-1 и 4-4. Дальнейшее увеличение толщины этой пробки приводит к снижению величин эквивалентных напряжений с величин 10 МПа и 9,5 МПа для моделей сечения 1-1 и 4-4 соответственно, которые при толщине пробки 3,0 м составляют уже не более 4,0 МПа.

Целью моделирования сопряжений по сечению 3-3 и 5-5 является проверка величин толщины породной пробки, полученной на этапе моделирования по сечениям 1-1 и 4-4 и сравнение полученных результатов для установления возможности принятия типового размера пробки, равного 3,0 м («типовая пробка»), для которого выполнен расчет материалов по закладке наклонных ходков техотделом шахты.

Геология в моделях, физико-механические свойства слоев пород, включая показатель качества породы GSI, методика моделирования, область и характер оптимизации модели и другие параметры моделирования, в том числе характер задаваемых нагрузок и их величина, а также граничные условия, оставались такими, как на этапе расчета моделей по сечениям 1-1 и 4-4.

Поскольку подход к наклонного ходка к почве коренной лавы происходит (согласно сечению и схеме из плана горных работ, (*рис. 2*)) под углом к линии, параллельной забою лавы, рассматривалось такое сечение области сопряжения, при котором призабойное пространство лавы находится над наклонным ходком и при этом зона приложения нагрузки является такой, что позволяет анализировать напряжения в породной пробке между лавой и кровлей наклонного ходка при ее толщине от 0,0 м до 5,0 м.

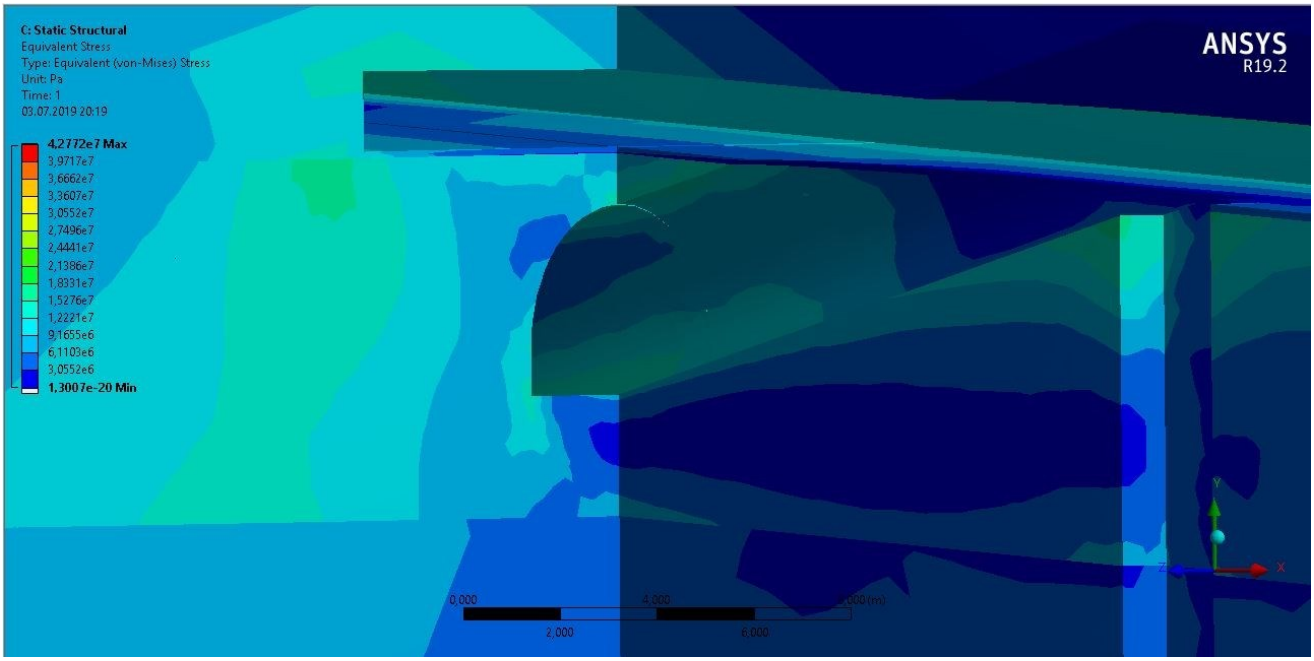
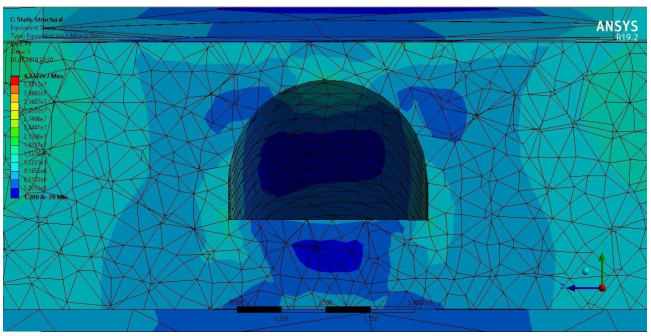
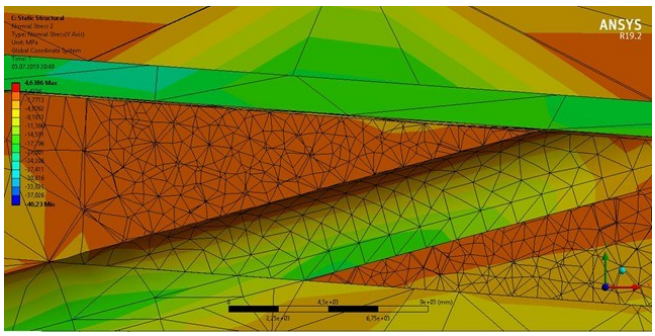


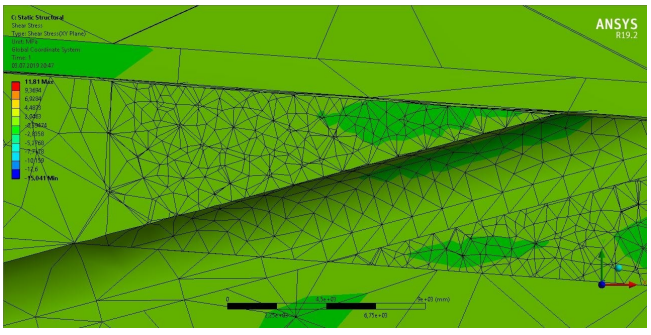
Рис. 12. Сопряжение по сечению 4-4. 3D-сечение с картиной распределения изополей эквивалентных напряжений по Мизесу в толще массива, окружающего сопряжения



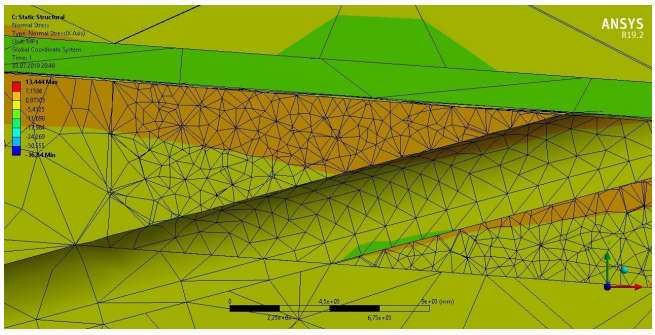
а)



б)



в)



г)

Рис. 13. Сопряжение по сечению 4-4. Картины распределения напряжений в толще породной пробки сопряжения: (а) плоское сечение картины эквивалентных напряжений; (б) нормальные вертикальные напряжения; (в) касательные напряжения; (г) нормальные горизонтальные напряжения

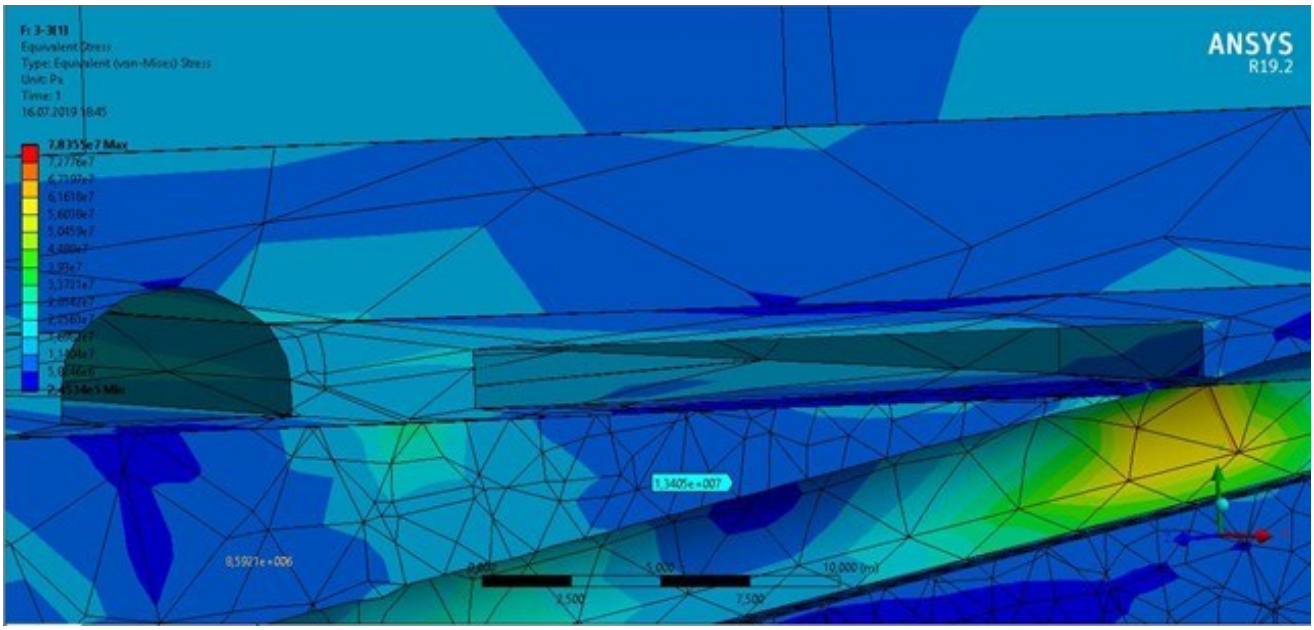


Рис. 14. Сопряжение по сечению 3-3. Картина распределения эквивалентных (приведенных) напряжений в сечении вдоль продольной оси наклонного ходка. Отметка с величиной напряжений соответствует величине породной пробке в 2,5 м

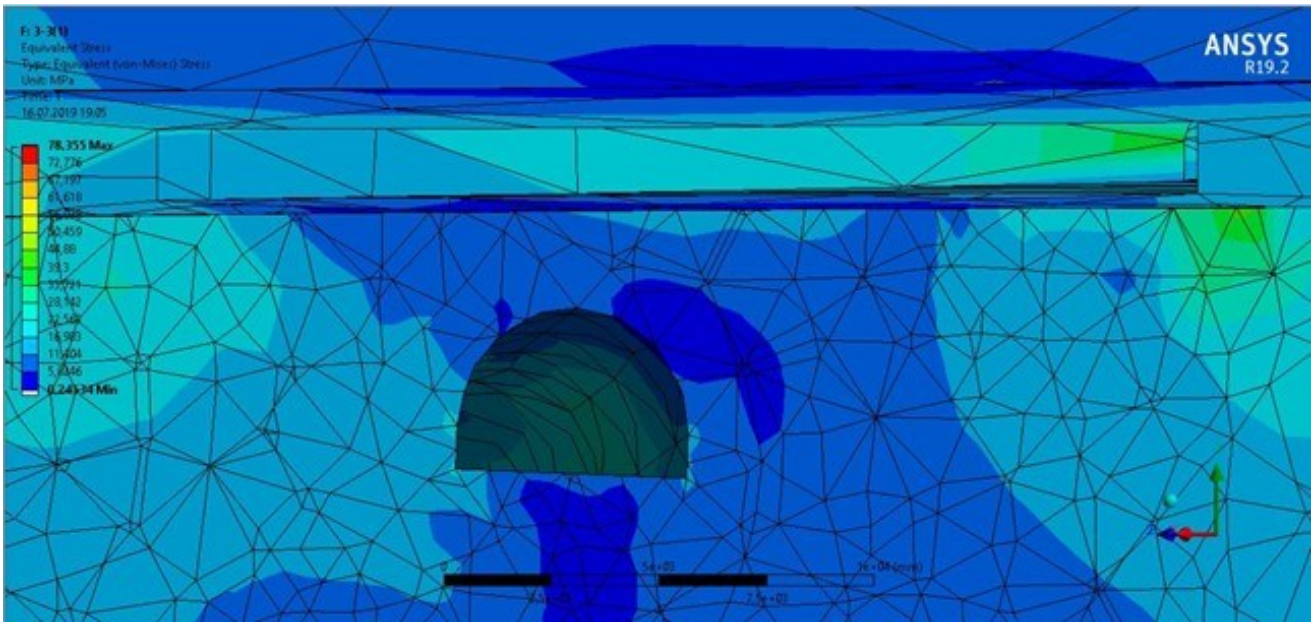


Рис. 15. Сопряжение по сечению 3-3. Картина распределения эквивалентных (приведенных) напряжений в сечении поперек продольной оси наклонного ходка при величине породной пробки в 2,5 м. Область повышенных напряжений охватывет толщу породной пробки с выходом на почву лавы и кровлю наклонного ходка

Качественные и количественные результаты моделирования по сечению 3-3. Распределение напряжений в толще породной пробки и ее окрестностей представлено на (рис. 14-16). По аналогии с предыдущими расчетами, потенциально опасным было принято сечение породной пробки («языка» сопряжения), при котором изолинии повышенных напряжений в ее толще над кровлей наклонного ходка сливаются с изолиниями таких напряжений в почве коренной лавы гор. 593 м. На (рис. 14 и 15), где представлены разные плоские сечения картины распределения эквивалентных (приведенных) напряжений по Мизесу, этот эффект (слияние изополей и формирование области повышенных напряжений) хорошо заметен.

На (рис. 14) представлена картина распределения нормальных горизонтальных напряжений. Как на (рис. 13, в, рис. 13, г), так и на

(рис. 14) имеет место область слияния повышенных напряжений в породной пробке над кровлей наклонного ходка, которая формирует потенциально опасное сечение. Все картины распределения напряжений в данной модели представлены для толщины породной пробки, равной 2,5 м, что укладывается в толщину 3,0 м, которая принята шахтой как типовая толщина породной пробки (высота «языка» сопряжения). Уровни напряжений получены следующими: эквивалентные (рис. 13 и 15) – до 10,5 МПа; при удалении от сопряжения по наклонной сбойке (при увеличении толщины породной пробки) абсолютные величины эквивалентных напряжений снижаются; нормальные горизонтальные (рис. 16) – от -5,2 МПа до +5,9 МПа (смена знака!).

Таким образом, результаты моделирования по сечению 3-3 показывают, что толщина породной пробки в потенциально опасном сечении составляет 2,5 м, что укладывается в размер «типовой пробки» принятой специалистами шахты равной 3,0 м. Отличие от результатов моделирования по первому этапу (толщина пробки 1,0-1,2 м) составляет от 2,1 до 2,5 раз, что обусловлено геометрией сопряжения и углом наезда комплекса на опасный участок сопряжения с наклонным ходком.

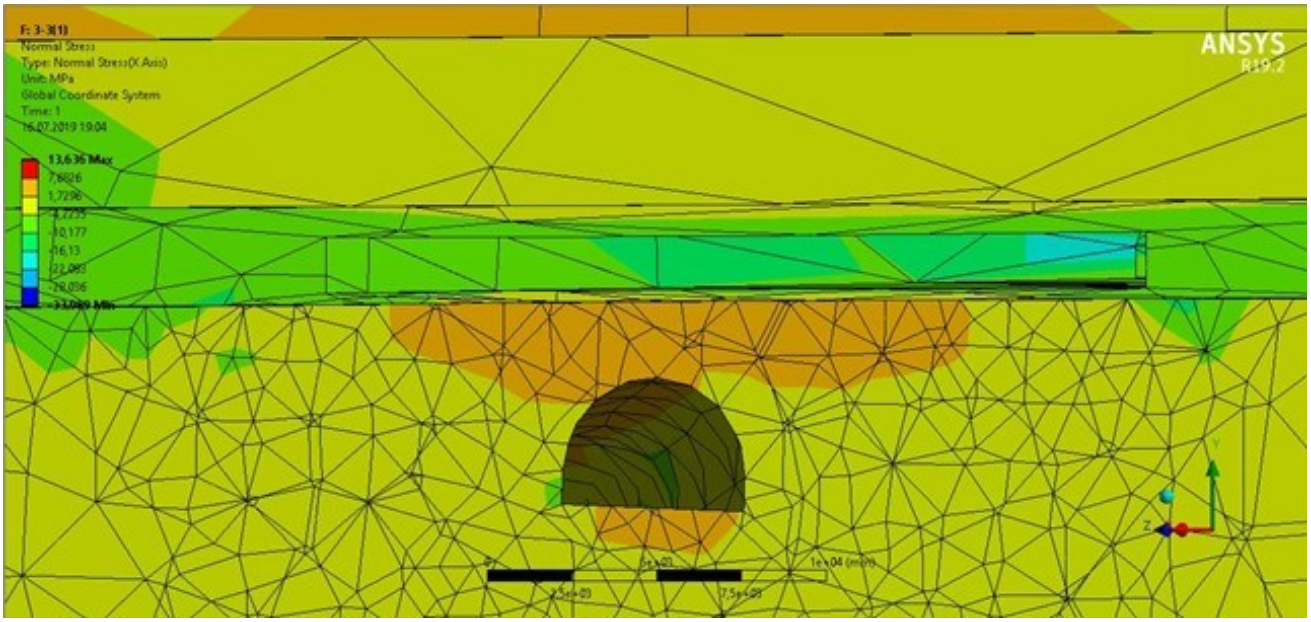


Рис. 16. Сопряжение по сечению 3-3. Картина распределения нормальных горизонтальных напряжений в сечении поперек продольной оси наклонного ходка при величине породной пробки в 2,5 м. Область повышенных напряжений охватывет толщу породной пробки с выходом на почву лавы и кровлю наклонного ходка

Качественные и количественные результаты моделирования по сечению 5-5. Пространственная геометрия данного сопряжения является самой сложной из рассмотренных моделей. При этом моделировалась ситуация, аналогичная сопряжению по сечению 3-3, т.е. когда полость лавы позволяла рассматривать различную величину породной пробки – от 0,0 м до 5,0 м. Картина распределения эквивалентных напряжений по сечению, параллельному забою лавы, представлена на (рис. 17). В ходе моделирования установлено, что потенциально опасной является толщина пробки, равная 2,0 м, для которой и представлена картина на (рис. 17).

Средняя величина эквивалентных (приведенных) напряжений по сечению с толщиной пробки 2,0 м составляет 10 МПа, что несколько меньше таковых для сопряжения по сечению 3-3. Вместе с тем величина действующих напряжений не превышает 30% от предельных.

Таким образом, результаты моделирования по сечению 5-5 показывают, что толщина породной пробки в потенциально опасном сечении составляет 2,0 м, что укладывается в размер «типовой пробки», принятой специалистами шахты равной 3,0 м. Отличие от результатов моделирования по первому этапу (толщина пробки 1,0-1,2 м) составляет от 1,6 до 2,0 раз, что обусловлено геометрией сопряжения и углом наезда комплекса на опасный участок сопряжения с наклонным ходком.

Параллельно с моделированием геологической службой шахты были получены первые описания о состоянии обнажений брошенных выработок (наклонных технологических сбоек), которые показали наличие в кровле таких сбоек технологически нарушенных пород с системами наведенной терщиноватости. С целью учета влияния этих зон повышенной трещиноватости, которые формируются в окрестности давно пройденных выработок были разработаны и построены новые модели, в которых было введена возможность учета таких зон повышенной терщиноватости (ЗПТ), поскольку ранее использовавшиеся модели не позволяли анализировать ЗПТ в ходе расчетов, представляя картины распределения напряжений и деформаций в массиве, хотя и построенные с учетом показателя качества GSI исходной породной среды, но все же не учитывающие обновленные данные по качеству массива в кровле брошенных технологических сбоек. Опираясь на результаты предыдущих этапов моделирования, габаритные размеры новых моделей (размеры областей моделирования) были уменьшены до минимально возможных и допустимых с точки зрения релевантности результатов размеров, т.е. до таких, при которых краевые эффекты от влияния граничных условий не оказывают воздействия на значимую область модели. Кроме того, учитывая, что при расчете нагрузки на крепь по методике ДонУГИ (согласно СОУ 10.1.00185790.011:2007) оперируют понятием «средневзвешенная прочность пород» в кровле и почве выработки, в новых моделях

также приняты упрощения и реальная структура толщи пород заменена на ее средневзвешенные эквиваленты в кровле и почве пласта Это позволило уйти от формирования слоистого массива, заменим его трансверсально изотропной средой с дефектами в виде полостей выработок.

Перед выполнение моделирования по методике, изложенной в СОУ 10.1.00185790.011:2007, предварительно была оценена высота ЗПТ над кровлей выработок. Для наклонных сбоек однозначная оценка величины ЗПТ затруднительна, поскольку в каждом сечении наклонной выработки, строго говоря, будет получено свое значение средневзвешенной прочности пород в кровле и почве выработки на глубину до 20 м. По выполненным оценкам (анализировалось два сечения – у подошвы коренной лавы и в середине длины наклонного ходка), расчетная величина ЗПТ может варьировать от 2,6 м до 5,1 м. Поэтому в моделях принято ее среднее значение, равное 4 м. В пределах ЗПТ прочностные свойства пород уменьшались путем введения к исходной прочности и жесткостным параметрам пород коэффициента структурно-механического ослабления kc=0,7 в соответствии с методологией СОУ 10.1.00185790.011:2007.

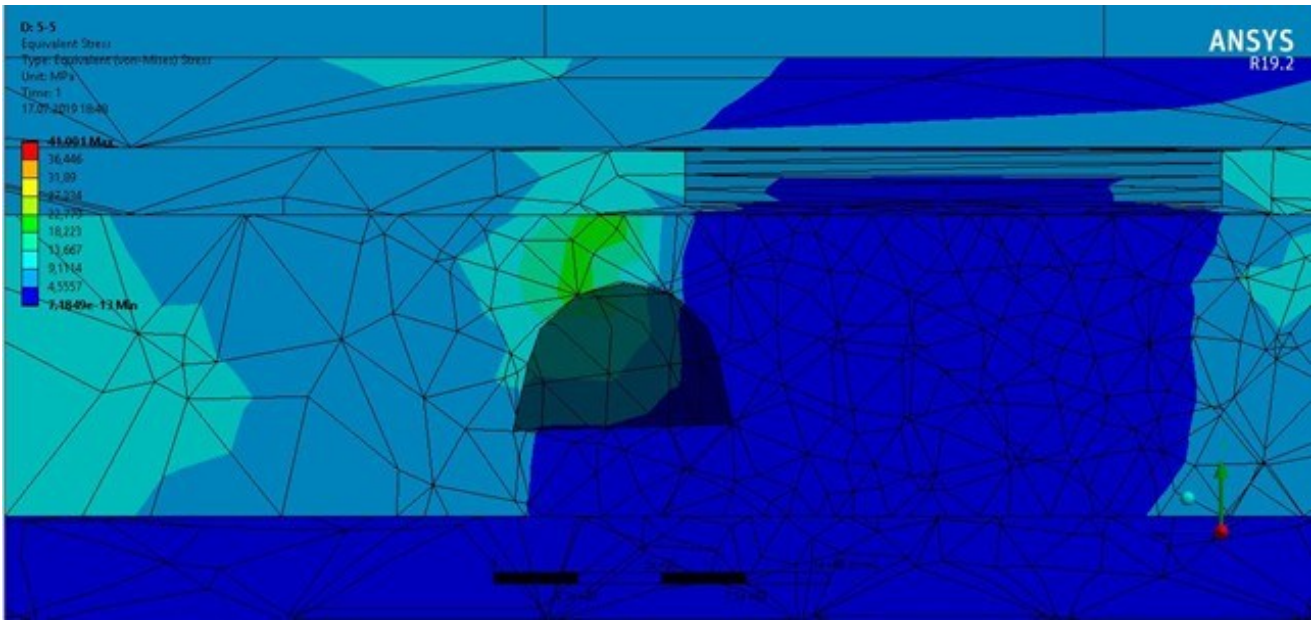


Рис. 17. Сопряжение по сечению 5-5. Картина распределения эквивалентных (приведенных) напряжений по Мизесу при величине породной пробки, равной 2,0 м

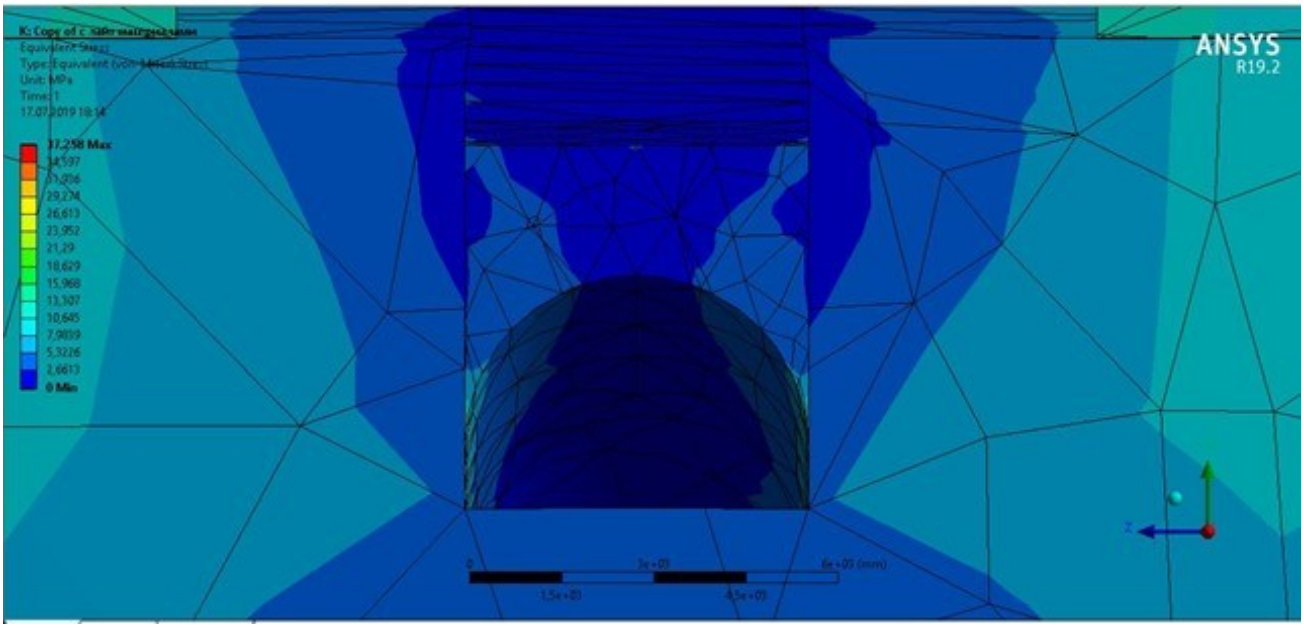


Рис. 18 – Корректированная модель сопряжения по сечению 1-1 (с учетом зоны повышенной трещиноватоти). Распределение эквивалентных (приведенных) напряжений при толщине пробки 1,5 м. Видно слияние изополей повышенных напряжений в кровле наклонного ходка с переходом на почву лавы

Для сокращения времени счета было решено оценить степень влияния присутствия ЗПТ в моделях на полученный результат и затем применить к уже имеющимся результатам корректирующий коэффициент. Поскольку все ранее полученные результаты укладываются в размер «типовой пробки», такой подход оправдан.

Расчеты выполнялись для сопряжений по сечению 1-1 как типовому и наиболее просто корректируемому. В ходе моделирования получены следующие результаты.

В рассмотренной модели (с учетом ЗПТ высотой 4 м) области повышенных напряжений ожидаемо локализуются в пределах ЗПТ, однако в силу снижения жесткости пород величины действующих напряжений в целом оказываются ниже, чем для моделей без ЗПТ, но при этом увеличивается жеформируемость участков пород в области породной пробки, что в совокупности приводит к увеличению полученной потенциально опасной толщины пробки – для модели с ЗПТ она составила 1,32-1,5 м (для разных видов напряжений) против 1,2 м для модели без ЗПТ, т.е., прирост составляет до 25%. Однако, для модели по сечению 1-1 даже полученная величина в 1,5 м все равно не превышает принятой техотделом шахты толщины «типовой пробки».

Средние эквивалентные (приведенные) напряжения при толщине пробки 1,5 м составляют 2,5 МПа, при этом эти же напряжения при величине пробки 3,0 м составляют уже 1,33 МПа, что в целом соответствует полученным ранее на первом этапе качественным результатам. Картина распределения эквивалентных (приведенных) напряжений по Мизесу представлена на (*рис. 18 и 19*). При этом на (*рис. 19*) представлена искривленная форма модели (масштабный коэффициент составляет 50 единиц), где стрелкой показана красная линия, по которой хорошо можно увидеть участок потенциально опасного сечения – именно с этой точки наблюдается заметная деформация «языка» сопряжения. Разумеется, данная иллюстрация имеет чисто качественный характер.

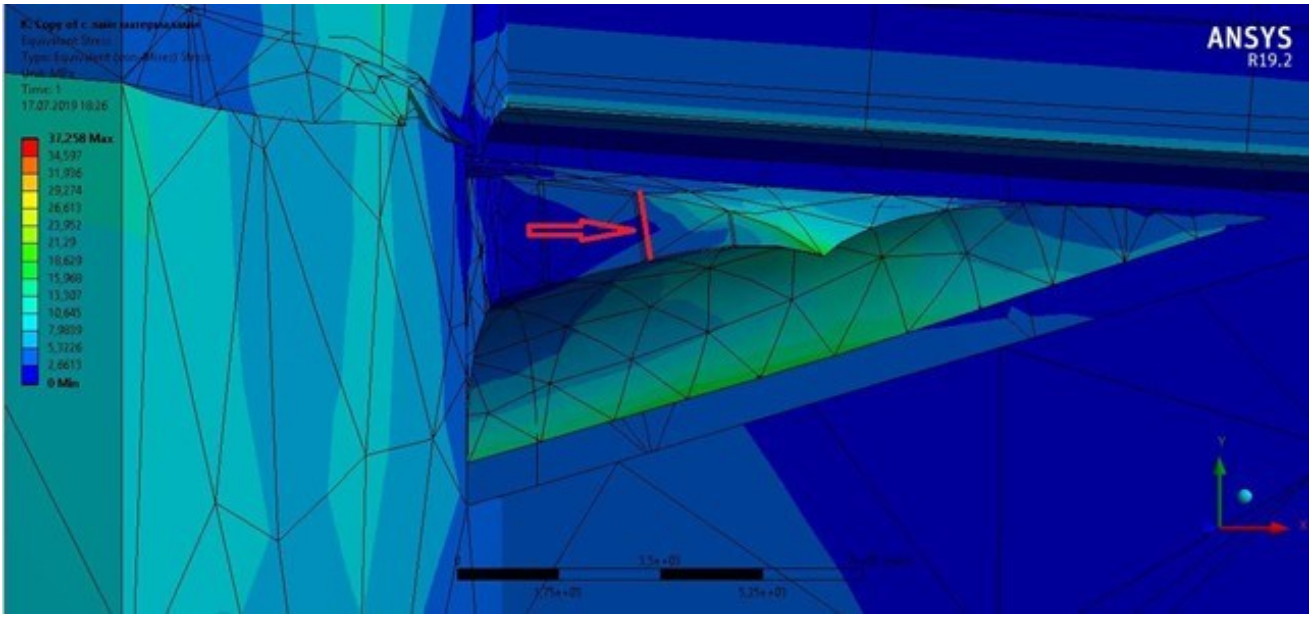


Рис. 19 – Деформированная форма конечно-элементной модели (масштабный коэффициент 50 единиц) с учетом зоны повышенной трещиноватости (сопряжение по сечению 1-1). Стрелкой и красной линией показан участок начала потенциально опасной породной пробки, толщина которой составляет 1,5 м

Таким образом, учет ЗПТ приводит к уменьшению жесткости породной среды в зоне и вызывает увеличение потенциально опасной толщины породной пробки над наклонным ходком на 25%. Тогда, полученные ранее результаты на моделях без ЗПТ должны быть откорректирована следующим образом, представленным в (табл. 3). Анализ (табл. 3) показывает, что в целом результаты с учетом ЗПТ укладываются в область принятой «типовой пробки» (пробка на сопряжении по сечению 3-3 на 3% больше «типовой пробки», что несущественно).

Таблица 3

Корректировка результатов оценки потенциально опасной толщины породной пробки

Сопряжение по сечению	Потенциально опасная толщина пробки, м	
	без учета ЗПТ	с учетом ЗПТ
1-1	1,2	1,5
3-3	2,5	3,1
4-4	1,0	1,3
5-5	2,0	2,5

Обсуждение результатов.

Полученные результаты показывают, что наличие технологических наклонных сбоек и бункеров в зоне влияния очистных работ оказывает существенное влияние на перераспределение напряжений в породном массиве при переходе лавой указанных сопряжений. Формирование потенциально опасных зон связано с концентрацией напряжений в толще породной пробки («языка» сопряжения), расположенной между почвой лавы и кровлей наклонной сбойки. При уменьшении толщины данной пробки наблюдается смыкание изополей повышенных напряжений, что указывает на формирование области ослабленного состояния массива и вероятность продавливания породной перемычки под действием нагрузки от механизированного комплекса. Полученные закономерности согласуются с результатами исследований других авторов, посвященных переходу лавой старых и брошенных выработок, в которых также отмечается существенное ухудшение условий поддержания кровли в зоне сопряжений.

Результаты моделирования по сечениям 1-1 и 4-4 показали, что критическими являются состояния при толщине породной пробки соответственно 1,2 м и 1,0 м. При дальнейшем увеличении толщины пробки наблюдается существенное снижение эквивалентных напряжений. Это объясняется изменением характера передачи нагрузки в массиве и увеличением несущей способности породной перемычки между лавой и кровлей наклонной сбойки. Одновременно установлено, что в опасных сечениях имеют место изменения знака нормальных напряжений, что свидетельствует о возникновении изгибных деформаций в толще породной пробки.

Преимуществом выполненного исследования по сравнению с рядом аналогичных работ является рассмотрение не абстрактной геомеханической схемы пересечения лавой старой выработки, а конкретных инженерно-геологических и горнотехнических условий действующего угледобывающего предприятия. В работе учитывались реальные параметры технологических наклонных сбоек, геометрия сопряжений, литологическое строение массива, а также физико-механические свойства пород. Дополнительным преимуществом является использование пространственных конечноэлементных моделей с учетом геологического индекса прочности GSI, что позволило получить более детализированную картину напряженно-деформированного состояния массива в окрестности сопряжений. Практическая направленность исследования заключается в возможности непосредственного использования результатов моделирования для обоснования параметров закладки наклонных сбоек и определения безопасной толщины породной пробки при переходе лавой рассматриваемых сопряжений.

Результаты моделирования по сечениям 3-3 и 5-5 подтвердили возможность принятия типовой толщины породной пробки, равной 3,0 м. Несмотря на наличие локальных зон повышенных напряжений, при указанной толщине пробки формирование критического состояния массива не наблюдается. Это свидетельствует о достаточности принятого инженерного решения для обеспечения безопасного перехода лавой наклонных технологических сбоек и бункеров в рассматриваемых горно-геологических условиях.

Вместе с тем выполненное исследование имеет ряд ограничений. Численное моделирование выполнялось в статической постановке в режиме нелинейной упругости. Динамика работы механизированной крепи, включая периодические изменения нагрузок при снятии и приложении распорных усилий секций крепи, напрямую в модели не учитывалась и задавалась косвенно через коэффициент пригрузки в соответствии с нормативными требованиями. Это может приводить к определенному упрощению реального характера взаимодействия механизированного комплекса и породного массива.

Еще одним ограничением исследования является отсутствие возможности выполнения натурной верификации полученных результатов непосредственно в условиях шахты. Это связано с объективными причинами, а именно — остановкой предприятия и невозможностью проведения подземных наблюдений в условиях активных боевых действий на территории расположения шахты. Вследствие этого сопоставление результатов моделирования с инструментальными шахтными наблюдениями в рамках данной работы не представлялось возможным.

Дальнейшее развитие исследований целесообразно направить на изучение влияния различных вариантов заполнения технологических наклонных сбоек на изменение напряженно-деформированного состояния массива в зоне сопряжений. Особый интерес представляет оценка влияния физико-механических свойств закладочных материалов на устойчивость породной пробки и перераспределение напряжений в окрестности пересечения лавы и выработки. Кроме того, при наличии технической возможности перспективным направлением является сопоставление результатов численного моделирования с данными шахтных наблюдений и инструментального контроля состояния массива непосредственно в процессе перехода лавой подобных сопряжений.

Заключение (Conclusion). В результате выполненного исследования установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния геомеханической системы «лава – технологическая наклонная сбойка – породный массив» при переходе очистным забоем ранее проведенных технологических выработок в условиях шахтоуправления «Покровское». Численным моделированием подтверждено, что наличие наклонных сбоек и бункеров вызывает локальное перераспределение напряжений с формированием зон их концентрации в толще породной пробки между почвой лавы и кровлей наклонного ходка.

Расчеты показали, что наиболее опасное состояние массива связано со смыканием изополей повышенных напряжений в пределах «языка» сопряжения. Для рассмотренных моделей критическими являются толщины породной пробки порядка 1,0–1,2 м. При увеличении толщины пробки наблюдается снижение эквивалентных напряжений и уменьшение вероятности разрушения породной перемычки под воздействием нагрузки от механизированного комплекса.

Установлено, что при толщине породной пробки 3,0 м характер распределения напряжений свидетельствует об отсутствии признаков формирования критического состояния массива. Это подтверждает возможность применения принятого проектного решения в качестве типового для рассматриваемых горно-геологических условий и обеспечивает необходимый уровень устойчивости сопряжений при переходе лавой технологических наклонных сбоек и бункеров.

Выполненное исследование подтвердило эффективность применения пространственного конечноэлементного моделирования для оценки устойчивости сложных геомеханических систем при отработке пластовых месторождений. Использование моделей с учетом литологического строения массива, геометрии сопряжений и структурной нарушенности пород позволило получить детализированную картину распределения напряжений в наиболее нагруженных участках.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании мероприятий по безопасному переходу очистными забоями технологических выработок, определении параметров закладки наклонных сбоек и оценке устойчивости породных обнажений в аналогичных горно-геологических условиях.

Благодарность.

Авторы выражают признательность сотрудникам кафедры строительства, геотехники и геомеханики Национального технического университета «Днепровская политехника» (Украина) к.т.н. Халимендику А.В. и Нечитайло А.Е. за помощь в процессе подготовки численных моделей к анализу; сотрудникам Шахтоуправления «Покровское» (Украина) за содействие в выполнении исследований, предоставление необходимой геологической и технологической информации, а также в обсуждении и критическом анализе полученных результатов.

Библиографический список:

1. Babets, D., Sdvyzhkova, O., Shashenko, O., Kravchenko, K., & Cabana, E. C. (2019). Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation while excavating through fault zones. Mining of Mineral Deposits, 13(4), 72–83. https://doi.org/10.33271/mining13.04.072.
2. Li, Y., Lei, M., Wang, H., Li, C., Li, W., Tao, Y., & Wang, J. (2019). Abutment pressure distribution for longwall face mining through abandoned roadways. International Journal of Mining Science and Technology. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.018.
3. Jiang, Z., et al. (2021). Surrounding Rock Control Technology When the Longwall Face Crosses Abandoned Roadways: A Case Study. GeoFluids. DOI: 10.1155/2021/7867460.
4. Shi, S., Miao, Y., Wu, H., Xu, Z., & Liu, C. (2022). The Stress Evolution of Adjacent Working Faces Passing through an Abandoned Roadway and the Damage Depth of the Floor. Energies, 15(16), 5824. DOI: 10.3390/en15165824.
5. Du, Y., Feng, G., Zhang, Y., Zhang, X., Zhai, Y., & Bai, J. (2020). Pressure reduction mechanism and effect of working face passing through abandoned roadway by roof presplit. Energy Science & Engineering, 8(10), 3502–3513. DOI: 10.1002/ese3.760.
6. Zhang, X., Gong, P., Wang, K., Li, J., & Jiang, Y. (2019). Characteristic and Mechanism of Roof Fracture Ahead of the Face in an LTCC Panel When Passing an Abandoned Roadway: A Case Study from the Shenghua Coal Mine, China. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52, 2775–2788. DOI: 10.1007/s00603-019-01751-6.
7. Yu, Y., Lu, J., Pan, Y., Zhao, X., & Chen, D. (2021). Research and Practice on Filling Technology of Fully Mechanized Coal Mining Face through Trend Abandoned Roadway. Sustainability, 13(17), 9920. DOI: 10.3390/su13179920.
8. Li, Y., et al. (2021). A Novel Mining Method for Longwall Panel Face Passing through Abandoned Roadway: A Case Study. Advances in Civil Engineering. DOI: 10.1155/2021/9998561.
9. Singh, R. N., Porter, I., & Hematian, J. (2001). Finite element analysis of three-way roadway junctions in longwall mining. International Journal of Coal Geology, 45(2–3), 115–125. DOI: 10.1016/S0166-5162(00)00027-6.
10. Shabanimashcool, M., & Li, C. C. (2012). Numerical modelling of longwall mining and stability analysis of the gates in a coal mine. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 51, 24–34. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.02.002.
11. Shabanimashcool, M., & Li, C. C. (2013). A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine. International Journal of Coal Geology, 106, 39–47. DOI: 10.1016/j.coal.2012.12.008.
12. Eremin, M., Peryshkin, A., Esterhuizen, G., Pavlova, L., & Fryanov, V. (2022). Numerical Analysis of Pillar Stability in Longwall Mining of Two Adjacent Panels of an Inclined Coal Seam. Applied Sciences, 12(21), 11028. DOI: 10.3390/app122111028.
13. Shashenko, A., Gapieiev, S., & Solodyankin, A. (2009). Numerical simulation of the elastic-plastic state of rock mass around horizontal workings. Archives of Mining Sciences, 54(2), 341–348. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77954884091&partnerID=40&md5=4e014d10752eeab1d6c33e443250b5ae.
14. Hoek, E. (2000). Practical rock engineering. Retrieved May 18, 2026, from https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner.



Гапеев Сергей Николаевич – профессор кафедры «Горное дело», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: sergey.gapeev@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0203-7424

Hapieiev Serhii Mykolaiovych – Department of Mining Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: sergey.gapeev@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0203-7424

Gapeyev Sergey Nikolayevich – "Konchilik ishi" kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: sergey.gapeev@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0203-7424



Хакимов Шодибой Икматуллаевич – профессор кафедры «Горное дело», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: sh.xakimov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3189-6745

Khakimov Shodiboy Ikmatullayevich – Department of Mining Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: sh.xakimov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3189-6745

Xakimov Shodiboy Ikmatullayevich – "Konchilik ishi" kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: sh.xakimov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3189-6745



Тимченко Александр Николаевич – аспирант кафедры строительства, геотехники и геомеханики, Национальный технический университет «Днепровская политехника»
E-mail: Tymchenko.o.m@nmu.one
ORCID: 0009-0009-2757-4788

Tymchenko Oleksandr Mykolaiovych – Graduate student, Department of Civil Engineering, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology
E-mail: Tymchenko.o.m@nmu.one
ORCID: 0009-0009-2757-4788

Timchenko Aleksandr Nikolayevich – "Qurilish, geotexnika va geomekanika" kafedrasi aspiranti, Dniprovska politexnika milliy texnika universiteti
E-mail: Tymchenko.o.m@nmu.one
ORCID: 0009-0009-2757-4788



UO‘K 622.02:539.3 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.7

QAZIB OLISH ISHLARI TA’SIRIDA KON LAHIMI MUSTAHKAMLAGICHLARIGA TUSHADIGAN YUKLAMALARNI CHEKLI ELEMENTLAR USULI ASOSIDA BAHOLASH

K.D. Salyamova[1], G‘.X. Bakirov[2], F.Yu. Zairova[2], X.A. Nurxonov[3]

[1]O‘zR FA Mexanika va inshoatlar seysmik mustahkamligi instituti, O’zbekiston Respublikasi
[2]Olmaliq davlat texnika instituti, O’zbekiston Respublikasi
[3]Qarshi davlat texika universiteti, O’zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Mazkur maqolada yer osti kon lahimlari atrofidagi tog‘ jinsi massivining kuchlanish-deformatsiya holati chekli elementlar usuli (CHEU) asosida sonli modellashtirish orqali kon lahimi mustahkamlagichidagi yuklamani aniqlash jarayoni tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi qazib olish ishlari natijasida tog‘ jinsi massivida yuzaga keladigan kuchlanishlarning qayta taqsimlanish qonuniyatlarini aniqlash hamda ushbu jarayonning arka romli metall mustahkamlagichlarning kuchlanish-deformatsiya holatiga ta’sirini miqdoriy baholashdan iborat. Hisoblash modelida tog‘ jinslarining deformatsion va mustahkamlik xususiyatlari, tabiiy kuchlanishlar, lahim geometriyasi hamda yon tomonlama bosim koeffitsiyentining turli qiymatlari hisobga olingan. Modellashtirish natijalariga ko‘ra, lahim konturi bo‘ylab maksimal kuchlanish kontsentratsiyasi shakllanadigan hududlar, ularning fazoviy rivojlanish xususiyatlari va kuchlanishlarning qayta taqsimlanish yo‘nalishlari aniqlangan. Shuningdek, yon tomonlama bosim koeffitsiyentining o‘zgarishi mustahkamlagich elementlarida hosil bo‘ladigan bo‘ylama kuchlar, eguvchi momentlar va boshqa ichki kuchlarga ta’siri tahlil qilingan. Olingan natijalar asosida mustahkamlagichning yuklanish darajasi va deformatsion holatini baholash imkoniyati yaratilgan. Tadqiqot natijalari murakkab geomexanik sharoitlarda kon lahimlarining turg‘unligini ta’minlash, mustahkamlagich parametrlarini ilmiy asosda tanlash va qazib olish jarayonlarining xavfsizligini oshirish uchun amaliy ahamiyatga ega.*

Kalit so‘zlar: *chekli elementlar usuli, kon lahimi, kuchlanish holati, mustahkamlagich, geomexanika, yon bosim koeffitsiyenti.*

ОЦЕНКА НАГРУЗОК НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ВЛИЯНИИ ГОРНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Салямова К.Д.[1], Бакиров Г.Х.[2], Заирова Ф.Ю.[2], Нурхонов Х.А.[3]

[1]Институт сейсмической прочности механики и сооружений АН РУз, Республика Узбекистан
[2]Алмалыкский государственный технический институт, Республика Узбекистан
[3]Каршинский государственный технический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной статье исследовано напряжённо-деформированное состояние массива горных пород, окружающего подземную горную выработку, с использованием численного моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) с целью определения нагрузок, действующих на крепь горной выработки. Основной целью исследования является выявление закономерностей перераспределения напряжений в массиве горных пород, возникающих в результате ведения горных работ, а также количественная оценка влияния данного процесса на напряжённо-деформированное состояние арочной металлической крепи. В расчётной модели учтены деформационные и прочностные характеристики горных пород, природные напряжения, геометрические параметры выработки, а также различные значения коэффициента бокового давления. По результатам моделирования определены зоны максимальной концентрации напряжений, формирующиеся по контуру выработки, особенности их пространственного развития и направления перераспределения напряжений в массиве. Кроме того, проанализировано влияние изменения коэффициента бокового давления на продольные силы, изгибающие моменты и другие внутренние усилия, возникающие в элементах крепи. На основе полученных результатов обеспечена возможность оценки степени нагружения крепи и её деформированного состояния. Результаты исследования имеют практическое значение для обеспечения устойчивости горных выработок в сложных геомеханических условиях, научно обоснованного выбора параметров крепи и повышения безопасности ведения горных работ. Полученные результаты имеют важное значение для повышения устойчивости горных выработок и выбора оптимальных параметров крепления.*

Ключевые слова: *метод конечных элементов, горная выработка, напряжённое состояние, крепь, геомеханика, коэффициент бокового давления.*

ASSESSMENT OF LOADS ON MINE WORKING SUPPORTS UNDER THE INFLUENCE OF MINING OPERATIONS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

K.D. Salyamova[1], G.Kh. Bakirov[2], F.Yu. Zairova[2], Kh.A. Nurkhonov[3]

[1]Institute of Seismic Stability of Structures and Mechanics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
[2]Almalyk State Technical Institute, Republic of Uzbekistan
[3]Karshi State Technical University, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This paper investigates the stress–strain state of the rock mass surrounding an underground mine opening using numerical modeling based on the finite element method (FEM) to determine the loads acting on the support of the mine opening. The primary objective of the study is to identify the patterns of stress redistribution in the rock mass induced by mining operations and to quantitatively assess the effect of this process on the stress–strain state of arched steel supports. The numerical model incorporates the deformation and strength properties of the rock mass, in-situ stresses, geometric parameters of the mine opening, and different values of the lateral pressure coefficient. The modeling results enabled the identification of zones of maximum stress concentration developing along the excavation contour, as well as their spatial development characteristics and the directions of stress redistribution within the rock mass. In addition, the influence of variations in the lateral pressure coefficient on axial forces, bending moments, and other internal forces arising in the support elements was analyzed. Based on the obtained results, the load-bearing level and deformation state of the support can be quantitatively evaluated. The findings are of practical significance for ensuring the stability of underground mine openings under complex geomechanical conditions, scientifically substantiating support design parameters, and improving the safety of mining operations.*

Key words: *finite element method, mine working, stress state, support system, geomechanics, lateral pressure coefficient.*

Kirish

Kon lahimi mustahkamlagichiga ta'sir etuvchi kon bosimining shakllanishi qazib olish ishlari natijasida tog'-jinsi massivida yuzaga keladigan kuchlanish-deformatsiya holatining o'zgarishi bilan bevosita bog'liq. Ruda tanasini qazib olish natijasida massivning dastlabki muvozanat holati buzilib, qazilgan bo'shliq konturi atrofida kuchlanishlar qayta taqsimlanadi. Bunda maksimal kuchlanishlar, odatda, qazish bo'shlig'i konturi, uning shipi va yon devorlari yaqinida konsentratsiyalanadi. Mazkur jarayon tog' jinslarining deformatsiyalanishi va siljishiga olib kelib, hosil bo'lgan yuklamaning ma'lum qismi bevosita kon lahimi mustahkamlagich konstruksiyasiga uzatiladi. Mustahkamlagichga ta'sir etuvchi kon bosimni alohida yuk sifatida emas, balki massivdagi kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi, tog' jinslarining deformatsiyasi va qazib olish texnologiyasi o'rtasidagi o'zaro bog'liq geomexanik jarayonning natijasi sifatida qarash lozim. Qazib olish chuqurligi, qazib olish bo'shlig'ining o'lchamlari va shakli, qazib olish bo'shlig'idan kon lahimigacha bo'lgan masofa, bloklarni qazib olish ketma-ketligi, massivning fizik-mexanik xususiyatlari hamda tabiiy va tektonik kuchlanishlar mustahkamlagichga tushadigan yuklamaning miqdori va taqsimlanishini belgilovchi asosiy omillar hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi — yer osti ruda konlarida qazib olish ishlari jarayonida tog'-jinsi massivida yuzaga keladigan kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi qonuniyatlarini aniqlash hamda ushbu jarayonlarning mustahkamlagichga ta'sir etuvchi kon bosimining shakllanishiga ta'sirini baholashdan iborat. Bunda qazib olish chuqurligi, qazish bo'shlig'ining geometrik parametrlari, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari hamda tabiiy va tektonik kuchlanishlarning mustahkamlagichga uzatiladigan yuklamaning miqdori va taqsimlanishiga ta'siri aniqlanadi. Tadqiqot natijasida tog' bosimi va massivdagi kuchlanishlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni ifodalovchi geomekanik qonuniyatlarni asoslash hamda kon lahimlari mustahkamlagichlarining barqarorligini ta'minlashga yo'naltirilgan amaliy tavsiyalar ishlab chiqish ko'zda tutiladi.

Hozirgi vaqtda raqamli chekli elementlar usuli (CHEU) fan va texnikaning bir qator sohalarida statik va dinamik masalalarni yechishda keng qo'llaniladi. Dastlab, CHEU elastiklik nazariyasi muammosini kuchlar yoki siljishlar usuli bilan yechilgan struktura mexanikasi muammosi bilan almashtirish sifatida talqin qilingan.

Hozirgi vaqtda elastiklikning chegaraviy masalalarini chiziqli algebraik tenglamalar tizimiga qisqartiruvchi samarali kompyuter algoritmlari ishlab chiqilgan. Ushbu tenglamalarning tuzilishi juda muvaffaqiyatli bo'lib chiqadi: tizimning matritsasi simmetrik va tarmoqli tuzilishga ega. Bu holat tenglamalarni yechish tizimini uchburchak matritsali chiziqli tizimlarga qisqartirish imkonini beradi, bu esa, o'z navbatida, o'rganilayotgan hududning kuchlanish-deformatsiya holatini batafsil o'rganish imkonini beradi [1].

Mazkur tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, kon lahimlari atrofidagi kuchlanish holati arka romli metall mustahkamlagichlar bilan o'zaro bog'liq holda kompleks baholanib, yon tomonlama bosim koeffitsiyentining ichki kuchlarga ta'siri miqdoriy jihatdan aniqlangan.

Tekislik masalalarini hisoblash amaliyotida o'rganilayotgan maydon uchburchak elementlarga bo'linadi. Uchburchak elementlarning afzalligi noma'lumlar sonini kamaytirishdir, ular kutilgan gradiyent joylarida bo'linish to'rlarini qalinlashtirishga imkon beradi va hisoblangan maydonning murakkab chegaralarini konturlashda juda qulaydir [2].

Metodika

Tuzilmalar va inshootlarni chekli elementlar usuli bilan hisoblash quyidagi bosqichlarda amalga oshiriladi:

Hududni chekli elementlarga ajratish
Tugunlarni raqamlash
Qattiqlik matritsasini shakllantirish
Global tenglamalar tizimini tuzish
Algebraik tenglamalar tizimini yechish
Kuchlanish va deformatsiyalarni aniqlash

Hisoblashlarda uchburchak chekli elementlardan foydalanildi, bu esa murakkab konturli sohalarni aniqlik bilan modellashtirish imkonini berdi.

EHM da CHEU tomonidan tuzilmalarni hisoblashda yuzaga keladigan eng muhim va murakkab vazifalardan biri butun tuzilish uchun algebraik tenglamalar tizimining koeffitsiyentlarini shakllantirishni

avtomatlashtirishdir [5]. Ushbu muammoni hal qilmasdan, kompyuterda CHEUda muammolarni hal qilishni tasavvur qilib bo'lmaydi.

Umumiy qattiqlik matritsasini shakllantirish usuli ma'lum bo'lganidan farq qiladigan ochiq kon ishlarining konturga yaqin zonasining kuchlanish-deformatsiya holati to'g'risidagi kon geomexanikasining muammolari bilan bog'liq holda CHEU ni amalga oshirish algoritmi ishlab chiqilgan. Ular har bir element uchun o'sha yerda va har bir tugun uchun taklif qilinganida hosil bo'ladi [3].

Madellashtirish usulida olib borilgan tadqiqot natijalariga ko'ra nimqavat shtreklari atrofidagi massivda va qazish olish blokining shiftida siqilish kuchlanishlarining ortib borayotgan qiymatlarini ifodalaydi. Siqilish kuchlanishlarining maksimal qiymati eng pastki nimqavat shtreki atrofidagi massivga va qazish blokning shiftidagi massivga to'g'ri keladi. Siqilish kuchlanishlarining maksimal qiymati tog' jinslarining buzilishga chegarviy pishiqligi ko'rsatkichiga yaqinlashsa massivda buzilish, siljish deformatsiyalari boshlanadi. Shunga ko'ra qazib olish bo'shlig'i shiftida katta hajmdagi buzilish zonasi va qazib olish bo'shlig'i osiq yon tomonidagi massivda siljish zonalari shakillangan [4]. Qazib olish bo'shlig'ining yon tomonlarida yuqori kuchlanish zonalari kuzatilmasligining hisobiga ushbu gorizontda ruda tanasining yotiq tomonida joylashgan tayyorlov kon lahimi atrofidagi massivning holati kon lahimiga salbiy ta'sir ko'rsatmaydi [5].

Hisoblash modeli. Kuchlanish holatini modellashtirish, «Razvetka» konining bir nechta qazib olish uchastkalari uchun ham amalga oshirildi.

Modellashtirish jarayonida quyidagi parametrlar qabul qilindi:

– tog' jinslarining hajmli og'irligi γ = 0,025 MN/m^3;

– ruda tanasi uchun Young moduli E = 5600 MPa;

– atrof tog' jinslari uchun Young moduli E = 5300 MPa;

– Puasson koeffitsienti n= 0,25.

«Razvetka» koni maydonining +745 m gorizontida qazib olish ishlari olib borilganda hosil bo'ladigan bo'shliq atrofidagi kuchlanish holatini modellashtirish natijalari 1-rasmda tangensial kuchlanish maydonining alohida komponentlari ko'rinishida aks ettirilgan. Bunda qazib olish bo'shlig'iga atrof tog' jinslari qulashining hisobiga kamera asosida 15 Mpa va yon tomonida 12 Mpa qo'shimcha bosim paydo bo'ladi. Olingan natijalar tog' jinsi massivida gorizontal kuchlanishlarning qayta taqsimlanishida quyidagi asosiy qonuniyatlar mavjudligini ko'rsatadi:

1. Qazib olish bo'shlig'ining kon lahimi joylashgan yon chegarasida hamda maydon shtrekining yon devorlari yaqinida gorizontal yo'nalishdagi siqilish kuchlanishlari kontsentratsiya zonalar shakllanadi. Bu holat qazib olingan bo'shliq ta'sirida yuklamaning qayta taqsimlanishi va massivning tayanch qismlarida qo'shimcha siqilish maydonining yuzaga kelishi bilan izohlanadi.

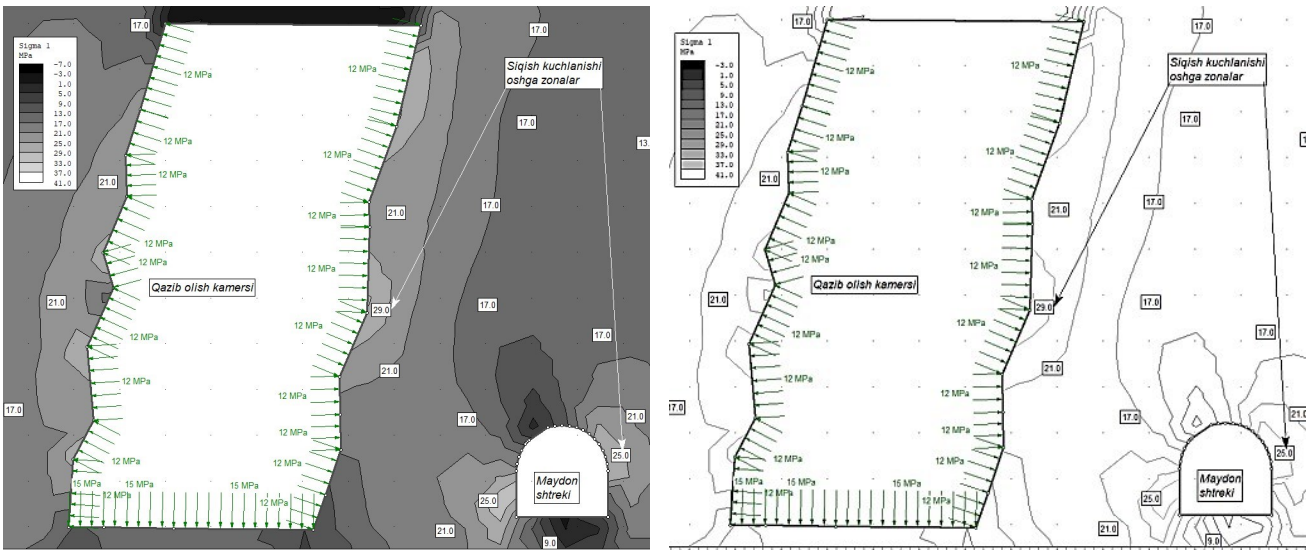
2. Kon lahimi shift qismi chap yon tomonida ikkilamchi asosiy kuchlanishlarning ortishi kuzatiladi. Mazkur zonalarda kuchlanish intensivligining oshishi konstruktiv elementlarning barqarorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi hamda geomexanik jihatdan noqulay uchastkalar shakllanishiga sabab bo'lishi mumkin.

3. Qazib olish bo'shlig'ining ruda tanasi osilgan yon tomoniga tutashgan burchak qismida tangensial kuchlanishlarning maksimal qiymatlari qayd etiladi. Ushbu uchastka kuchlanish kontsentratsiyasining lokal o'chog'i bo'lib, potensial deformatsion jarayonlar rivojlanishi ehtimoli yuqori hudud sifatida baholanadi.

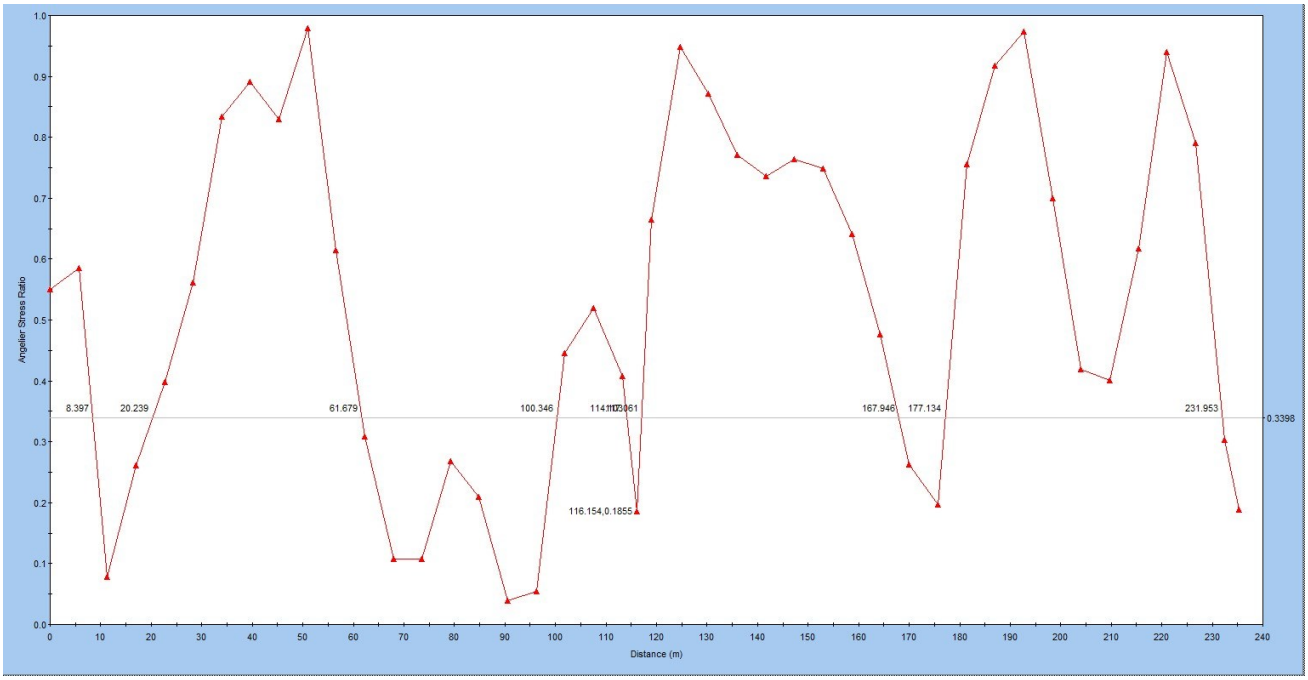
4. Qazib olish bo'shlig'ining yuqori qismida atrof tog' jinslarining bo'shliqga qulashining hisobiga kamera shiftidagi massivda tog' jinslarining deformatsiyasi jadallashadi.

Shunday qilib, +745 m gorizont sharoitida qazib olish jarayoni tog' jinsi massivida murakkab, ko'p komponentli kuchlanish maydonini shakllantiradi. Aniqlangan kuchlanish kontsentratsiyasi zonalari kon lahimlarining barqarorligini ta'minlash, mustahkamlash parametrlarini asoslash hamda geodinamik xavfli uchastkalarni prognoz qilishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Yuqorida keltirilgan matematik modellashtirish natijalariga ko'ra gorizontal kuchlanishlarning maksimal qiymatlari asosan tashish shtrteki atrofidagi tog' jinsi massivlarida yuzaga kelgan. Ikkita ruda tanasida qazib olish ishlari rivojlanishi bilan ular oralig'ida joylashgan tashish shtregi turg'unligiga ta'sir qiluvchu kuchlanish maydonlararining soni va ta'sir etish mexanizmi ortib boradi. Dastlab tayyorlov kon lahimlar majmuiga tektonik kuchlanishlar maydoni ta'sir etsa keyinchalik qazib olish ishlari rivojlanishi bilan tangensial, siqilish va cho'zilish kuchlanish maydonlari ta'siri qo'shilib boradi. Kon lahimlariga ta'siri etuvchi ushbu kuchlanish maydonlari kon lahimi uzunligi bo'ylab turli qiymatlarda ta'sir etadi [4].



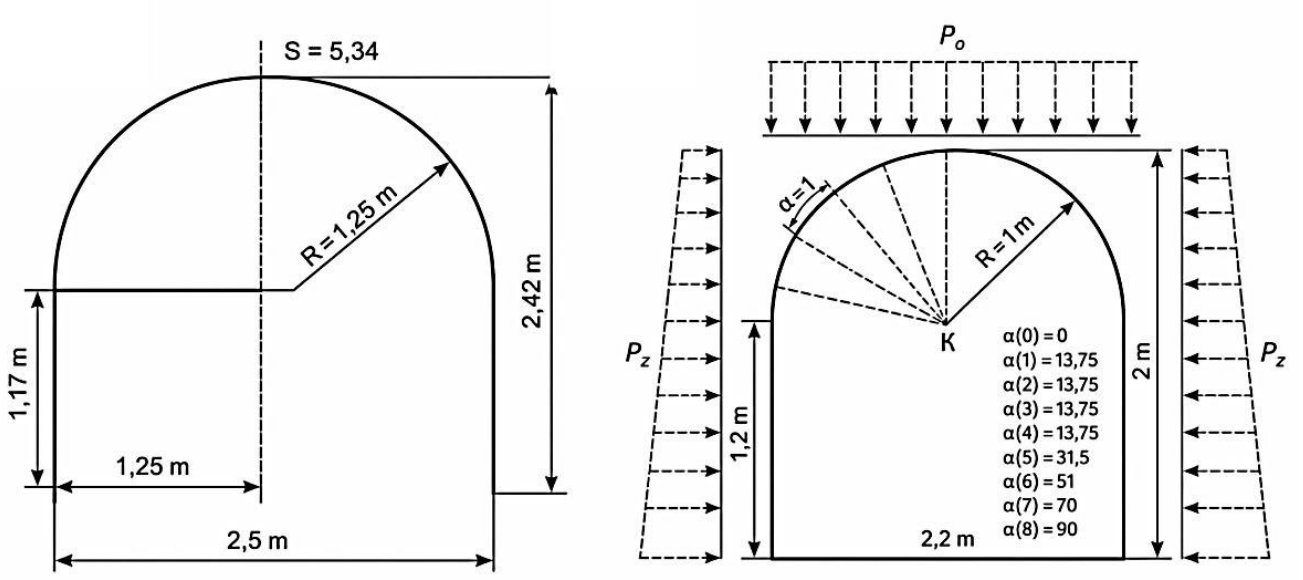
1-rasm. «Razvetka» koni maydonida +745 gorizontini qazib olish jarayonidan keyin tog' jinsi massivida gorizontal kuchlanishlarning σ_1 tarqalish xususiyati.



2-rasm. 1 G ruda tanasi konturi bo‘ylab gorizontal kuchlanishlarining σ_x taqsimlanish grafigi.

Bundan tashqari «Razvetka» konining markaziy uchastkasi +745 gori zontada joylashga, kata o‘lchamlarga ega bo‘lmagan ruda tanasini qazib olishdan so'ng tog' jinsi massivida gorizontal kuchlanishning tarqalish izochiziqlari 1-rasmda tasvirlangan. Gorizontal kuchlanishning tarqalish izochiziqlari tahlili shuni ko‘rsatadiki hududlarda gorizontal kuchlanishlarining keng ta’sir doirasi hosil bo‘ladi. Ushbu ta’sir doiralarida massivdagi kuchlanish maydonlarining qayta taqsimlanishiga olib keladi. Kuchlanish maydonlarini taqsimlashning sifat va miqdor ko'rinishlari o‘zgarishsiz qolmoqda.

2-rasmda 1G ruda tanasi konturi bo‘ylab gorizontal kuchlanishlarining σ_x taqsimlanish grafigi keltirilgan. Gorizontal kuchlanishlarining o‘zgarish chegarasi 0 da 1 gacha koeffitsiyent ko‘rinishda bo‘lib unga ko‘ra (0-1)γH ni ifodalaydi. bu yerda γ - ruda tanasidan yuqorida yotgan tog‘ jinslarning hajmiy og'irligi, kg/m^3, H -yer yuzasigacha bo‘lgan masofasi, m.



a – mustahkamlagich parametrlari; b – hisoblash sxemasi

3-rasm. Tik ustunli arka romli mustahkamlagich.

Yuqoridagi grafikdan quyidagi xulosalrni olish mumkin:

- grafikning dastlabki 0–10 m qismida kuchlanish nisbatan yuqori qiymatlarni egallab, 10–12 m oralig'ida keskin kamayadi. Keyingi 15–55 m intervalda kuchlanishlarning izchil ortishi kuzatilib, 50–55 m atrofida yuqori konsentratsiya zonasi shakllanadi. Shundan so'ng 55–95 m oralig'ida σ_x qiymatlari sezilarli darajada pasayib, kuchlanishlarning relaksatsiyasi namoyon bo'ladi.

- 100–115 m oralig'ida kuchlanishlarning qayta ortishi va kamayishi kuzatilib, 115 m atrofida lokal minimum hosil bo'ladi. 120–160 m oralig'ida esa gorizontal kuchlanishlar yuqori darajada saqlanib, bir nechta lokal maksimumlar shakllanadi. Ayniqsa, 125–130 m va 145–150 m atrofidagi qiymatlar kuchlanishlarning sezilarli konsentratsiya-langanligini ko'rsatadi.

- grafikning 175–200 m oralig'ida yana kuchlanishlarning keskin ortishi kuzatilib, 190–195 m atrofida maksimal qiymatlarga yaqin-lashadi. 200–215 m oralig'ida kuchlanishlar kamayib, undan keyin 220–225 m atrofida navbatdagi yuqori konsentratsiya zonasi yuzaga keladi. Grafik oxirida, 230–238 m oralig'ida σ_x qiymatlarining keskin kamayishi kuzatiladi.

Qazib olish ishlari natijasida tog'-jinsi massivining kuchlanish-deformatsiya holati o'zgarib, unda yuzaga keladigan kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi kon lahimi mustahkamlagichiga ta'sir etuvchi tog' bosimining shakllanishiga bevosita sabab bo'ladi. 3-rasmda keng qo'llaniladigan, tayanchlari kon lahimi asosiga perpendikulyar joylashtiriladigan mustahkamlagichlar. Bunda kon lahimining ko'ndalang kesim yuzi 5,34 m^2, balandligi 2,42 m kengligi esa 2,5 m ni tashkil etadi.

Kon lahimi mustahkamlagichlarida paydo bo'ladigan kuch va momentlarni CHEU ni qo'llash bilan Borland Delphi 7 amaliy dasturiy paketidan foydalanib hisoblandi. Uning asosiy g'oyasi diskret modeldagi gorizontal va vertikal yo'nalishdagi reaksiya kuchlarini uzluksiz funksiya to'plamiga asoslab aproksimatsiyalashdan iborat.

$$\delta = \int_0^l \frac{M_1^2}{E\,J}\,dl, \qquad \Delta = \int_0^l \frac{M_1 M_q}{E\,J}\,dl\,, \tag{1}$$

bu yerda, l – yarim arka dugasining uzunligi;
M_1 – birlik kuch ta'sirida paydo bo'laligan eguvchi moment;
M_q – tashqi yuklamalar sistemasi ta'sirida paydo bo'laligan eguvchi moment;
E – Yung moduli;
J – eguvchi tekislikka perpendikulyar bo'lgan elementning asosiy o'qiga nisbatan mustahkamlagich elementi kesimining inersiya momenti.

Metall mustahkamlagich elementlarining markaziy siqilishdagi va cho'zilishidagi mustahkamligi quyidagi formula bilan tekshiriladi:

$$\frac{N}{F_{nt}} \le R \tag{2}$$

bu yerda, N – hisoblangan bo'ylama kuch;
F_{nt} – element ko'ndalang kesim yuzasi;
R – po'latning siqilishdagi va cho'zilishidagi qarshiligi.

Metal mustahkamlagich elementlarining markaziy siqilishdagi mustahkamligi quyidagi formula bilan tekshiriladi:

$$\frac{N}{\varphi \cdot F} \le R \tag{3}$$

bu yerda, φ – bo'ylama egilish koeffitsiyenti, eng katta yegilish funksiyasida $\lambda = l_0/r$;
F – element ko'ndalang kesim yuzasi;
l_0 – elementning hisoblangan uzunligi;
r – yuzaning inerchiya radiuci.

Asosiy tekisliklardan birida egilishda metall mustahkamlagich elementlarbning mustahkamlbgi 2 va 3 formular bilan tekshiriladi:

$$\frac{Q \cdot S}{J \cdot \delta} \le R_{sr} \tag{4}$$

$$\frac{M}{W_{nt}} \le R \tag{5}$$

bu yerda, W_{nt} – mustahkamlagich elementi siljigan qismining neytral o'qqa nisbatan qarshilik momenti;
δ – profil devorining qalinligi,
R va R_{sr} – mos holda hisoblangan egilish va kesishga po'lat qarshiligi.

Qiya yo'nalgan yuklama ostida ishlovchi metall mustahkamlagich elementlarining mustahkamligi ikki asosiy tekislikka nisbatan egilish sharoitida quyidagi ifoda orqali tekshiriladi:

$$\delta = \frac{M_{x\cdot y}}{J_x}\,y \pm \frac{M_{y\cdot x}}{J_y} \le \mathrm{R} \tag{6}$$

bu yerda, M_x, M_y – asosiy o'qlarga nisbatan eguvchi moment komponentlari;
x,y – ko'rib chiqilayotgan element nuqtasining uning asosiy o'qlariga nisbatan koordinatalari;
J_x, J_y – kesimning x–x va y–y o'qlariga nisbatan inersiya momentlari
R – materialning ruxsat etilgan kuchlanishi.

Arka romli tik ustunli metall mustahkamlagich uchun ichki kuchlar (bo'ylama kuch N, eguvchi moment M va ko'ndalang kuch Q) chekli elementlar usuli asosida hisoblab chiqildi. Hisoblashlarda mustahkamlagich konturi teng uzunlikdagi 8 ta segmentga ajratilib, natijada 9 ta hisoblash nuqtasi qabul qilindi.

Hisoblash parametrlari sifatida kon chuqurligi H = 100 m, tog' jinslarining hajmiy og'irligi γ = 2,5 t/m^3 va yon tomonlama bosim koeffitsiyenti λ = 0,4 deb olindi.

Har bir nuqtada hosil bo'ladigan ichki kuchlarning son qiymatlari aniqlanib, ularning mustahkamlagich bo'ylab taqsimlanishi 1-jadvalda keltirilgan.

Hisoblash uchun romli mustahkamlagichning chap yarmi qismidan foydalanilgan. Metall mustahkamlagichning ishlash holati moslashuvchan bo'lgani uchun, mustahkamlagichning butun konturini hisoblash shart emas. Arka romli mustahkamlagichning o'ng yarmi uchun M va N epyurlari simmetriya qoidasiga muvofiq, Q epyurasi

1-jadval

Arka romli tik ustunli mustahkamlagichda ichki kuchlar taqsimoti

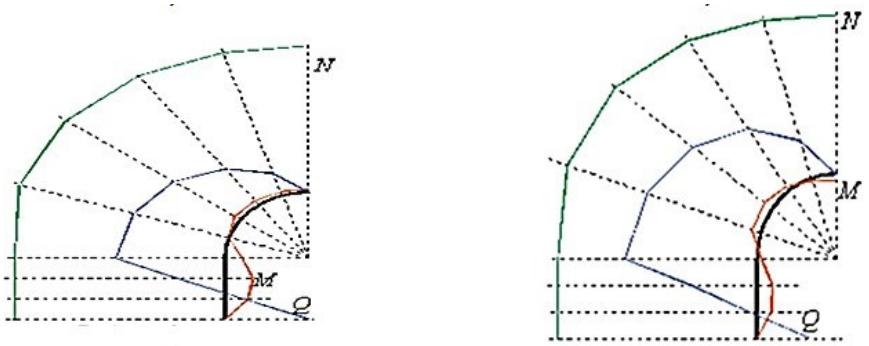
Nuqta	M (kN·m)	N (kN)	Q (kN)
0	0.000000	355.000000	-2.195266
1	-24.928775	331.261451	8.126840
2	-34.150429	318.040936	102.039897
3	-27.940322	304.643105	195.228325
4	-6.573812	291.067959	287.692125
5	10.981152	285.988071	257.031717
6	12.621572	259.850351	188.411338
7	7.932702	231.569780	105.168489
8	5.785941	220.048045	0.000000

esa – egri simmetriya qoidasiga ko‘ra qurilgan.

Har bir mustahkamlagich qismi uzunligi teng sakkizta segmentga bo‘lingan. Natijada mustahkamlagich qismining butun uzunligi pastki chap shamirdan boshlanuvchi to‘g‘ri burchakli koordinatalar tizimida to‘qqizta nuqta bilan tasvirlangan. Hisoblash jarayonida olingan yuklamalar son qiymati grafik yo‘l bilan masshtab bo‘yicha mustahkamlagich qismining mos keladigan nuqta koordinatalariga perpendikulyar to‘g‘ri chiziq bo‘ylab qo‘yiladi. Musbat qiymatlar kon lahimi mustahkamlagichining tashqi tomoniga, manfiy qiymatlar esa ichki tomoniga qo‘yiladi. Yon tomonlama bosim koeffitsiyentining o‘zgarishi mustahkamlagich ichki kuchlarining qiymatini sezilarli o‘zgarishiga olib keladi.

Yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 0,4 dan 1 gacha o‘zgarganda maksimal manfiy qiytmatlar farqi 194 % va musbat qiytmatlar farqi 1000 % ga teng bo‘ldi. Yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 1,0 dan 5,0 gacha o‘zgarganda esa maksimal manfiy qiytmatlar farqi 455 % va musbat qiytmatlar farqi 605 % ga teng bo‘ldi. Ko‘ndalang kuchning *Q* maksimal musbat qiymati to‘rtinchi nuqta koordinatasida, bu nuqta mustahkamlagichning to‘g‘ri chiziqli qismidan egri chiziqli qismiga o‘tish joyi. Ko‘ndalang kuchning *Q* qiymati yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 0,4 dan 1,5 gacha bo‘lgan interval bo‘yicha o‘zgarganda nolga tushadi va keyin manfiy qiymatni oladi. *Q* ning maksimal manfiy qiymati birinchi koordinata nuqtasida, ya’ni mustahkamlagichning pastki chap sharnirida joylashgan nuqtaga to‘g‘ri keladi va teng darajada ortadi. Yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 2 dan 5 gacha o‘zgarganda bo‘ylama kuchining barchasi manfiy qiymatlarni oladi.

Mustahkamlagich vertikal yon tayanchidagi ichki kuchlar taqsimlanishi ifodalangan epyuralar 4-rasmda tasvirlangan. Epyuralardan ko‘rinib turibdiki mustahkamlagichning to‘g‘ri chiziqli qismining egri chiziqli qismiga o‘tish joyida ko‘ndalang kuchning ***Q*** eng katta musbat qiymati ham mavjud.



a) b)

Yon tomonlama bosim koeffitsiyentlari: a – 0,4; b – 0,55

4-rasm. Tik ustunli arka romli metall mustahkamlagichda ichki kuchlarning (M, N, Q) taqsimlanish epyuralari

Mustahkamlagichning to‘g‘ri chiziqli qismida bo‘ylama kuchlar *N* doimiy bo‘lib qoladi. Uning maksimal qiymati mustahkamlagichning eng yuqori nuqtasida bo‘lib, yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 0,4 dan 5,0 gacha o‘zgarganda uning qiymati 9,1 marotabagacha oshadi. Yon tomonlama bosim koeffitsiyenti 0,4 ga teng bo‘lganda egilish momenti *M* mustahkamlagichning eng yuqori nuqtasida manfiy qiymatga erishadi.

Natijalar

Modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatadiki:

maksimal siqilish kuchlanishlari qazib olish bo‘shlig‘i shiftida yuzaga keladi;

tangensial kuchlanishlar qazib olish bo‘shlig‘i yon chegaralarida kontsentratsiyalanadi;

– eng katta kuchlanish qiymatlari ruda tanasining osilgan yon tomoniga tutashgan hududlarda kuzatiladi;

transport shtreklari atrofida kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi kuzatiladi.Ilmiy xulosa

Mazkur tadqiqotda kon lahimlari atrofidagi tog‘ jinsi massivining kuchlanish-deformatsiya holatini baholashda chekli elementlar usuli (CHEU) samarali va ishonchli matematik modellashtirish vositasi sifatida o‘zini to‘liq oqlashi isbotlandi. CHEU yordamida murakkab geomekanik jarayonlar chiziqli algebraik tenglamalar tizimi orqali ifodalanib, katta hajmdagi hisoblashlarni avtomatlashtirish imkoniyati yaratildi.

Modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatadiki, qazib olish ishlari olib borilganda tog‘ jinsi massivida kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi sodir bo‘lib, ayniqsa qazib olish bo‘shlig‘i chegaralari, nimqavat shtreklari va transport lahimlari atrofida yuqori darajadagi siqilish va tangensial kuchlanishlar konsentratsiyasi yuzaga keladi. Ushbu zonalar potensial deformatsiya va buzilish o‘choqlari sifatida tavsiflanadi.

Tahlillar natijasida quyidagi muhim qonuniyatlar aniqlandi:

– maksimal siqilish kuchlanishlari qazib olish bo‘shlig‘i shiftida va pastki nimqavat shtreklari atrofida shakllanadi;

– kuchlanishlarning kontsentratsiyasi, ayniqsa, ruda tanasining osilgan yon tomoniga tutashgan hududlarda yuqori bo‘ladi;

– bir nechta ruda tanalarini parallel qazib olish holatida kuchlanish maydonlari o‘zaro ta’sirlashib, transport lahimlari barqarorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi;

– yon tomonlama bosim koeffitsiyentining ortishi mustahkamlagich elementlarida ichki kuchlar (N, M, Q) ning keskin o‘zgarishiga olib keladi.

Arka romli metall mustahkamlagichlarni hisoblash natijalari shuni ko‘rsatdiki, konstruktsiyaning eng noqulay uchastkalari — to‘g‘ri va egri qismlar tutashgan zonalar hamda pastki sharnirlar hisoblanadi. Aynan shu nuqtalarda bo`ylama va ko'ndalang kuchlar, hamda egilish momentlarining eng noqulay kombinatsiyalari kuzatiladi. Bu esa mustahkamlagich parametrlarini tanlashda ushbu zonalarni alohida e’tiborga olish zarurligini ko‘rsatadi.

Shuningdek, tadqiqot natijalari asosida quyidagi amaliy xulosalar chiqarildi:

– kon lahimlarini loyihalashda kuchlanish kontsentratsiyasi zonalarini oldindan aniqlash va ularni hisobga olish zarur;

– mustahkamlash tizimlarini tanlashda yon bosim koeffitsiyenti va tog‘ jinslarining fizik-mexanik xossalari hal qiluvchi omil hisoblanadi;

– CHEU asosida olingan natijalar kon lahimlari barqarorligini oshirish, xavfli geodinamik zonalarni prognoz qilish va optimal mustahkamlash parametrlarini asoslashda muhim ilmiy-amaliy

ahamiyatga ega.

Umuman olganda, olib borilgan tadqiqotlar konchilik amaliyotida geomekanik jarayonlarni chuqur tahlil qilish, kon lahimlari barqarorligini ta'minlash hamda xavfsiz qazib olish texnologiyalarini ishlab chiqishda CHEUning yuqori samaradorligini tasdiqlaydi.

Xulosa

Mazkur tadqiqot natijalari kon lahimlari atrofidagi tog' jinsi massivida kuchlanish-deformatsiya holatini baholashda chekli elementlar usuli (CHEU) yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatdi.

Aniqlanishicha, qazib olish ishlari natijasida tog' jinsi massivida kuchlanishlarning murakkab qayta taqsimlanishi yuzaga kelib, maksimal siqilish va tangensial kuchlanishlar asosan qazib olish bo'shlig'i shifti va yon chegaralarida shakllanadi.

Tahlillar shuni ko'rsatdiki, yon tomonlama bosim koeffitsiyentining ortishi mustahkamlagich elementlarida ichki kuchlarning (N, M, Q) sezilarli darajada o'zgarishiga olib keladi. Eng noqulay uchastkalar sifatida mustahkamlagichning to'g'ri va egri qismlar tutashgan zonalari hamda tayanch sharnirlar aniqlangan.

Olingan natijalar asosida kon lahimlarini loyihalashda kuchlanish kontsentratsiyasi zonalarini hisobga olish, shuningdek, mustahkamlash parametrlarini optimal tanlash zarurligi asoslandi.

Umuman olganda, CHEU asosida olingan natijalar kon lahimlari barqarorligini oshirish, xavfli geodinamik jarayonlarni prognoz qilish va xavfsiz qazib olish texnologiyalarini ishlab chiqishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Bibliografik ro'yxati:

1. Sohibov I.Y. et al. Analysis of calculation of mine pressure in mine workings in the conditions of the "Qizil-Olma" mine using a 2D computer program // Finland International Scientific Journal of Education, Social Science & Humanities. – Helsinki: Finland Publishing, 2023. – Vol. 11. – No. 5. – Pp. 2414-2424.

2. Меликулов А.Д. и др. Геомеханические факторы повышения эффективности геотехнологий с учетом их ресурсовоспроизводства и ресурсосбережения в современных рыночных условиях // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент: Издательство АН РУз, 2019. – № 3. – С. 52-63.

3. Bakirov G. et al. Metall romli mustahkamlagich egiluvchan qismining ish sharoitlarini baholash va uning rejimini boshqarish // Sanoatda raqamli texnologiyalar. – Toshkent: O'zbekiston texnika universiteti nashriyoti, 2023. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 64-70.

4. Melikulov A.D., Xasanov O.A., Bakirov G. Kh., Nurxonov X.A. Alimov Sh.M., Analysis Of Numerical Calculation Of Rock Pressure In Underground Mining Works // AIP Conf. – Uzbekistan, 2025. – Proc. 3304, -pp – 030060-1. -030060-6.

5. Бекбергенов Д.К., Джангулова Г.К., Бектур Б.К. Определение граничного влияния очистных работ при комбинированной геотехнологии на глубоких горизонтах шахт Донских хромитов



Салямова Клара Джаббаровна – старший научный сотрудник Института сейсмической прочности механики и сооружений АН РУз, доктор технических наук, профессор
E-mail: klara_51@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7908-1186

Klara Jabbarovna Salyamova – Senior Researcher at the Institute of Seismic Strength, Mechanics and Structures, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor
E-mail: klara_51@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7908-1186

Salyamova Klara Djabbarovna – O'zR FA Mexanika va inshoatlar seysmik mustahkamligi instituti katta ilmiy xodimi, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: klara_51@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7908-1186



Бакиров Гайрат Холикбердиевич – доцент кафедры «Горное дело», Алмалыкский государственный технический институт, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
E-mail: qayratbakirov3004@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5471-6340

Gayrat Kholikberdievich Bakirov – Associate Professor of the Department of Mining Engineering, Almalyk State Technical Institute, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: qayratbakirov3004@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5471-6340

Bakirov G'ayrat Xoliqberdievich – Olmaliq davlat texnika instituti «Konchilik ishi» kafedrasi dotsenti, texnika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: qayratbakirov3004@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5471-6340



Заирова Фируза Юсуповна – старший преподаватель кафедры «Горное дело», Алмалыкский государственный технический институт, доктор философии по техническим наукам (PhD)
E-mail: firuzazairova1981@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6470-3719

Firuza Yusupovna Zairova – Senior Lecturer of the Department of Mining Engineering, Almalyk State Technical Institute, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences
E-mail: firuzazairova1981@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6470-3719

Zairova Firuza Yusupovna – "Konchilik ishi" kafedrasi katta o'qituvchisi, Olmaliq davlat texnika instituti, texnika fanlari falsafa doktori (PhD)
E-mail: firuzazairova1981@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6470-3719



Нурхонов Хусан Алмирза угли – доцент кафедры «Геология и горное дело» Каршинского государственного технического университета, доктор философии по техническим наукам (PhD) , доцент
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4526-7211

Khasan Almirza ugli Nurkhonov – Associate Professor of the Department of Geology and Mining Engineering, Karshi State Technical University, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4526-7211

Nurxonov Xasan Almirza o'g'li – «Geologiya va konchilik ishi» kafedrasi dotsenti, Qarshi davlat texika universiteti, texnika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4526-7211

UDC 622.45+628.511+629.331(075) DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.8

THE MINE ATMOSPHERE AS A WORKING FLUID IN A DIESEL ENGINE: AIR FLOW THROUGH THE AIR INTAKE SYSTEM AND DUST LOAD ON FILTERS

A. Makhmudov, S.T.Akhmedov

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This article examines the regulation of the mine atmosphere, which is based on protecting human health: the limit concentrations apply to the air in the work area, and the calculation of the required air volume ensures that contaminants are diluted to these levels. The engine of a self-propelled machine remains the second consumer of the same air, yet the air quality at its intake is neither regulated nor monitored. No quantitative relationship has been established between the dustiness of the mine atmosphere and the load on the air supply system. To determine the mine air flow rate through the air supply system of the self-propelled vehicle fleet in comparison with the standard supply rate and to quantitatively assess the dust load on the filtration equipment as a function of atmospheric dustiness. Data from an air -suction survey of a gold mine and research studies were used: the calculated dependence of the required air volume, measured air densities at nineteen points, measured air velocities at twenty-nine measuring stations, and the composition of the fleet of self-propelled vehicles. Air consumption by the engine was calculated using specific fuel consumption, the stoichiometric ratio, and the air excess coefficient, with a sensitivity analysis for each parameter. The dust load and maintenance frequency of the cleaning equipment were calculated as functions of dust concentration; the documented background dust level of a mechanized non-ferrous metal mine was taken as the reference value. It was found that at an air excess coefficient of 1.5, the standard air supply exceeds the air flow through the engine by a factor of 101; that is, the engine draws 0.99% of the air supplied to it; when switching to idle, the ratio decreases to 30. The conclusion is consistent: variations in specific fuel consumption within the range of 0.20–0.24 kg/(kW·h) and in mine air density within the measured range of 1.086–1.153 kg/m³ result in a change in the proportion ranging from 0.94% to 1.13%. A 275.8 kW dump truck with a load factor of 0.6 passes 669 m³ of mine air per hour through the air supply system, or 4,816 m³ per shift. At a background dust concentration of 0.80–1.17 mg/m³, 0.53–0.78 kg of dust enters the system per 1,000 operating hours; at a dust concentration of 10 mg/m³, the amount is 6.6 kg. The maintenance interval for the dust collector is inversely proportional to dust concentration: for a filter element with a dust-holding capacity of 500 g, it ranges from 1,510 operating hours at 0.5 mg/m³ to 38 operating hours at 20 mg/m³. Air velocities at the measurement stations range from 0.13 to 5.16 m/s, with a median of 2.38 m/s; at two stations, the velocity is below the minimum permissible level for working faces, and at one station, it is below the minimum for other mining areas. The engine's air supply system is the second, non-standardized consumer of the mine atmosphere, the capacity of which is determined by a ventilation system parameter—dust concentration—that is not measured during routine inspections.*

Key words: *mine atmosphere; diesel engine; air supply system; dust levels; air purification systems; air excess ratio; maintenance schedule.*

KON ATMOSFERASI DIZEL DVIGATELINING ISHCHI TANASI: HAVO UZATISH TRAKTI ORQALI HAVO SARFI VA TOZALASH VOSITALARIGA TUSHADIGAN CHANG YUKLAMASI

A. Maxmudov, S.T. Axmedov

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O‘zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Maqolada kon atmosferasini me’yorlash insonni himoya qilish asosiga qurilganligi ko‘rib chiqilgan: chegaraviy konsentratsiyalar ishchi zona havosiga tegishli bo‘lib, zarur havo miqdorini hisoblash aralashmaning ushbu qiymatlargacha aralashtirishini ta’minlaydi. O‘ziyurar mashina dvigateli esa xuddi shu atmosferaning ikkinchi iste’molchisi bo‘lib qoladi, bunda uning kirish qismidagi havo sifati me’yorlanmaydi va nazorat qilinmaydi. Kon atmosferasining changlanishi va havo uzatish traktiga tushadigan yuklama o‘rtasidagi miqdoriy bog‘liqlik aniqlanmagan. O‘ziyurar mashinalar parkining havo uzatish trakti orqali kon havosining sarfini me’yoriy uzatish bilan taqqoslab aniqlash va tozalash vositalariga tushadigan chang yuklamasini atmosferaning changlanganlik funksiyasi sifatida miqdoriy baholash. Oltin qazib olish konining havo-depressiya syomkasi ma’lumotlari va ilmiy-tadqiqot ishlari: zarur havo miqdorining hisobiy bog‘liqligi, o‘n to‘qqizta punkt bo‘yicha o‘lchangan havo zichligi, yigirma to‘qqizta o‘lchash stani bo‘yicha o‘lchangan havo harakati tezligi, o‘ziyurar texnika parki tarkibidan foydalanilgan. Dvigatel orqali havo sarfi solishtirma yonilg‘i sarfi, stexiometrik nisbat va ortiqcha havo koeffitsiyenti orqali har bir parametrga sezgirlik tahlili bilan hisoblab chiqilgan. Chang yuklamasi va tozalash vositalariga xizmat ko‘rsatish davriyligi chang konsentratsiyasining funksiyasi sifatida hisoblangan; tayanch qiymat sifatida rangli metallar bo‘yicha mexanizatsiyalashtirilgan konning hujjatlashtirilgan fon changlanishi qabul qilingan. Aniqlanishicha, havoning ortiqlik koeffitsiyenti 1,5 bo‘lganda, me’yoriy uzatish dvigatel orqali havo sarfidan 101 marta ko‘p bo‘ladi, ya’ni dvigatel o‘z quvvatiga uzatilayotgan havoning 0,99% ini oladi; salt ishlashga o‘tganda nisbat 30 gacha kamayadi. Xulosa barqaror: solishtirma yoqilg‘i sarfini 0,20–0,24 kg/ (kVt·soat) oralig‘ida va kon havosi zichligini 1,086–1,153 kg/m3 o‘lchangan oralig‘ida o‘zgartirish ulushni 0,94–1,13% oralig‘ida o‘zgartiradi. Quvvati 275,8 kVt bo‘lgan avtosamosval yuklanish koeffitsiyenti 0,6 bo‘lganda, havo uzatish trakti orqali soatiga 669 m3 kon atmosferasini yoki smenada 4816 m3 o‘tkazib beradi. Fon changlanishi 0,80-1,17 mg/m3 bo‘lganda, traktga 1000 motosoatda 0,53-0,78 kg chang, 10 mg/m3 bo‘lganda esa 6,6 kg chang tushadi. Tozalash vositasiga xizmat ko‘rsatish davriyligi changlanishga teskari proporsionaldir: chang sig‘imi 500 g bo‘lgan element uchun u 0,5 mg/m3 bo‘lganda 1510 motosoatni, 20 mg/m3 bo‘lganda esa 38 motosoatni tashkil etadi. O‘lchov stanlari bo‘yicha havo harakatining tezligi medianasi 2,38 m/s bo‘lganda 0,13 dan 5,16 m/s gacha o‘zgaradi;*

ikkita standa tezlik zaboylar uchun ruxsat etilgan minimaldan past, bittasida esa boshqa qazilmalar uchun minimaldan past bo'ladi. Dvigatelning havo uzatish yo'li kon atmosferasining ikkinchi, me'yorlashtirilmaydigan iste'molchisi bo'lib, uning resursi standart tekshiruvda o'lchanmaydigan shamollatish tizimi parametri - chang bilan aniqlanadi.

Kalit so'zlar: *kon atmosferasi; dizel yuritmasi; havo uzatish trakti; changlanganlik; havoni tozalash vositalari; ortiqcha havo koeffitsiyenti; texnik xizmat ko'rsatish davriyligi.*

РУДНИЧНАЯ АТМОСФЕРА КАК РАБОЧЕЕ ТЕЛО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ: РАСХОД ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ТРАКТ ВОЗДУХОПОДАЧИ И ПЫЛЕВАЯ НАГРУЗКА НА СРЕДСТВА ОЧИСТКИ

Махмудов А., Ахмедов С.Т.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В статье рассмотрены нормирование рудничной атмосферы построено на защите человека: предельные концентрации относятся к воздуху рабочей зоны, а расчёт потребного количества воздуха обеспечивает разбавление примеси до этих значений. Двигатель самоходной машины при этом остаётся вторым потребителем той же атмосферы, причём качество воздуха на его впуске не нормируется и не контролируется. Количественная связь между запылённостью рудничной атмосферы и нагрузкой на тракт воздухоподачи не установлена. Определить расход рудничного воздуха через тракт воздухоподачи парка самоходных машин в сопоставлении с нормативной подачей и количественно оценить пылевую нагрузку на средства очистки как функцию запылённости атмосферы. Использованы данные воздушно-депрессионной съёмки золотодобычного рудника и научно-исследовательские работы: расчётная зависимость потребного количества воздуха, измеренные плотности воздуха по девятнадцати пунктам, измеренные скорости движения воздуха по двадцати девяти замерным станам, состав парка самоходной техники. Расход воздуха через двигатель вычислен через удельный расход топлива, стехиометрическое отношение и коэффициент избытка воздуха с анализом чувствительности к каждому параметру. Пылевая нагрузка и периодичность обслуживания средств очистки рассчитаны как функции концентрации пыли; в качестве опорного значения принята документированная фоновая запылённость механизированного рудника по цветным металлам. Установлено, что при коэффициенте избытка воздуха 1,5 нормативная подача превышает расход воздуха через двигатель в 101 раз, то есть двигатель забирает 0,99 % подаваемого на его мощность воздуха; при переходе к холостому ходу отношение снижается до 30. Вывод устойчив: варьирование удельного расхода топлива в диапазоне 0,20–0,24 кг/(кВт·ч) и плотности рудничного воздуха в измеренном диапазоне 1,086–1,153 кг/м³ изменяет долю в пределах 0,94–1,13 %. Автосамосвал мощностью 275,8 кВт при коэффициенте загрузки 0,6 пропускает через тракт воздухоподачи 669 м³ рудничной атмосферы в час, или 4816 м³ за смену. При фоновой запылённости 0,80–1,17 мг/м³ в тракт поступает 0,53–0,78 кг пыли за 1000 моточасов, при запылённости 10 мг/м³ — 6,6 кг. Периодичность обслуживания средства очистки обратно пропорциональна запылённости: для элемента пылеёмкостью 500 г она составляет от 1510 моточасов при 0,5 мг/м³ до 38 моточасов при 20 мг/м³. Скорости движения воздуха по замерным станам изменяются от 0,13 до 5,16 м/с при медиане 2,38 м/с; на двух станах скорость ниже минимально допустимой для забоев, на одном — ниже минимума для прочих выработок. Тракт воздухоподачи двигателя является вторым, ненормируемым потребителем рудничной атмосферы, ресурс которого определяется параметром вентиляционной системы — запылённостью, — не измеряемым при штатном обследовании.*

Ключевые слова: *рудничная атмосфера; дизельный привод; тракт воздухоподачи; запылённость; средства очистки воздуха; коэффициент избытка воздуха; периодичность технического обслуживания.*

Introduction

The mine atmosphere in an underground mine operating self-propelled diesel equipment serves two users. The first is humans, for whom maximum permissible concentrations of harmful substances have been established and for whose protection the entire ventilation system is designed. The second is the internal combustion engine, for which the mine atmosphere serves as the working medium: air enters the cylinders, participates in combustion, and determines both the performance of the operational process and the service life of the cylinder-piston assembly components.

There is a complete asymmetry in the attention given to these two "consumers." For the first, standards have been established for gaseous components and the dispersed phase [13, 14], monitoring methods have been developed, and the calculation of the required air volume is based precisely on the condition of diluting impurities to the maximum permissible levels [1, 3]. For the second, nothing is standardized: none of the known documents contain requirements for the quality of the intake air for an engine operating in an underground mine.

Meanwhile, the relationship here is direct and one-way. Everything that is suspended in the mine's atmosphere enters the air intake system of the machine operating in that mine. The only barrier is the air purification device, whose characteristics—capture efficiency and dust-holding capacity—are regulated by an international standard [7]. However, the frequency of its maintenance is determined not by the characteristics of the filter itself, but by the product of the air flow rate through the engine and the dust concentration in the atmosphere—that is, a parameter of the ventilation system.

This raises a question that has not been quantitatively addressed in the existing literature: What is the volume of mine air flowing through the air supply system of the self-propelled vehicle fleet compared to the

standard supply rate, and what is the corresponding dust load on the air purification equipment?

The objective of this study is to determine the flow rate of mine air through the air supply system of the self-propelled vehicle fleet in comparison with the standard flow rate and to quantitatively assess the dust load on the filtration systems as a function of atmospheric dust content.

Objectives:

Determine the relationship between the air flow rate through the engine per unit of power and the air excess coefficient, and compare it with the standard air supply rate.

To assess the stability of the obtained ratio with respect to the assumed values of specific fuel consumption and mine air density.

To calculate the volume of mine air passing through the air supply system of vehicles with different power ratings.

To determine the mass of dust entering the air supply system as a function of atmospheric dust content.

Determine how the maintenance interval for the air cleaning system depends on dust concentration.

Analyze compliance with regulatory minimum air velocity standards based on survey data.

Literature Review

Atmospheric Dust Levels in Mechanized Mines

The most comprehensive review of the formation, health effects, and control measures for respirable dust in fully mechanized mines for non-ferrous and rare metals is provided in [5]. National standards are also cited there; for example, in India, according to Regulation 124 of the Metalliferous Mines Regulations, the time-weighted average concentration of respirable dust over an eight-hour shift must not exceed 3 mg/m³ when the free silicon dioxide content is less than 5%.

Quantitative data relevant to this study were obtained in [6] using real-time high-resolution aerosol spectrometry. It was shown that in the absence of visible dust and with no mining operations taking place near the measurement points, the average concentration of total suspended particulate matter at two locations in the mechanized mine was 1,170 ± 320 and 796 ± 68 μg/m³, with the proportion of particles 10 μm or smaller amounting to 87.9% and 99.4%, respectively, and the proportion of PM2.5 particles ranging from 18.5% to 40.3%.

These values are crucial: they characterize background dust levels—that is, the level the machine encounters not at the working face, but in the haulage and auxiliary tunnels, where it spends most of its operating time. The particle size distribution is such that the overwhelming majority of the mass consists of particles capable of passing through the inertial stages of the filtration system.

Diesel-derived aerosol phase

In addition to mineral dust, the atmosphere contains an aerosol phase derived from exhaust gases. The characteristics of aerosols formed during the operation of diesel equipment in underground conditions, as well as the breakdown of contributions from different categories of machinery, are investigated in [10]; for the current generation of engines, the relevant data are presented in [11]. Field measurements of elemental carbon exposure before and after equipping the fleet with neutralization systems were conducted in [12]. Limit values for the dispersed phase were established in [13, 14].

The diesel-derived particulate matter has a significantly smaller particle size than mineral dust, and its contribution to the mass load on the purification systems is small; however, it increases the number concentration of particles in the atmosphere that the vehicle inhales.

Regulation of Engine Air Purification Systems

The characteristics of air filters for the intake air of internal combustion engines and compressors are standardized by an international standard [7], which establishes uniform test procedures and defines key performance indicators: aerodynamic resistance, dust capture efficiency, dust-holding capacity, and oil carryover for inertial oil filters.

It is important to note that the standard specifies the product's properties, not its operating conditions. Dust-holding capacity is expressed in grams of retained dust; the standard does not—and cannot—specify at what concentration in the ambient atmosphere, and consequently over what period of time, this capacity will be exhausted. This parameter pertains to the mine's ventilation system.

Standard Air Supply and Dust Removal Criteria

The required air volume for self-propelled diesel equipment is determined based on the rated engine power [1, 3], although the origin of the specific standards used is not documented [8]. In addition, a separate dust removal criterion applies: the volume of air required to remove dust suspended in the mine atmosphere is determined as the product of the minimum permissible jet velocity and the cross-sectional area of the working face, with the minimum velocity being 0.25 m/s for reserve longwall faces and 0.15 m/s for other workings [1, 3].

The rationale behind this criterion is to keep the dust suspended and remove it from the working face. A consequence that is not usually noted is that the air in which the dust is kept suspended is the very same air that enters the engine of the machine operating in the working face.

Materials and Methods

Data Sources

A research report was used. The following were taken from the report: the calculated relationship between the required air volume and its parameters; the calculation method based on the dust removal factor and minimum permissible velocities; the specific air weights at nineteen measurement points; air velocities at measurement stations along two routes; a list of self-propelled equipment in operation; and the composition and number of machines assumed to be operating simultaneously.

Data on atmospheric dust levels in the mechanized mine were taken from [5, 6], and the characteristics of the air purification systems were standardized according to [7].

Calculation of Air Flow Through the Engine

The mass flow rate of air through the engine per unit of effective power is determined by the product of the specific effective fuel consumption, the stoichiometric ratio, and the air excess coefficient:

$$G = \frac{b_e\, l_0\, \lambda}{3600}, \qquad \text{kg/(s·kW)} \tag{1}$$

where b_e is the specific effective fuel consumption, kg/(kW·h); l_0=14,5 kg/kg is the stoichiometric amount of air for diesel fuel; λ is the air excess coefficient. The volumetric flow rate at a mine air density of ρ:

$$V = \frac{G}{\rho}, \qquad \frac{\text{m}^3}{(\text{s}\cdot\text{kW})} \tag{2}$$

A comparison with the standard flow rate q=6,8 m³/(kW·min) =0,11333 m³/(s·kW) was performed using the ratio q/V and the fraction 100·V/q.

Base values: b_e=0,210 kg/(kW·h), ρ=1,13 kg/m³ (average across nineteen measurement points), λ=1,5 (operating condition close to rated). A sensitivity analysis was performed: b_e in the range of 0,20–0,24 kg/(kW·h), ρ in the measured range of 1,08643–1,15294 kg/m³, λ from 1,3 (full load) to 5,0 (idling).

Dust Load and Maintenance Frequency

The mass of dust entering the air supply duct during time t at concentration C:

$$m = V_{\text{th}}\, C\, t\, \eta, \tag{3}$$

where V_{th} is the volumetric flow rate through the engine, m³/h; η is the capture efficiency of the cleaning agent, assumed to be 0.99.

Maintenance Interval for an Element with Dust Capacity M_f:

$$T = \frac{M_f}{V_{th}\, C\, \eta}. \quad (4)$$

The calculations were performed for machines with power ratings of 82.5 kW (the average machine used for air consumption calculations [1]), 121,4 kW, 275,8 kW, and 304 kW, with a motor load factor of 0,6 and for concentrations ranging from 0,5 to 20 mg/m³. Dust-holding capacity varied in the range of 200–1,000 g.

Analysis of Air Velocities

Twenty-nine measurement points located in mine workings were selected from the research study (the fan unit and ventilation duct were excluded). The measured velocities were compared with the minimum permissible values of 0.25 and 0.15 m/s [1, 3].

The calculations were performed in Python 3 (NumPy).

Results and Discussion

Air Flow Through the Engine and Design Air Flow

The results of the calculations based on (1)–(2) are presented in Table 1 and Figure 1.

Key finding: Under operating conditions close to rated conditions, the standard air supply exceeds the air flow through the engine by a factor of 101; the engine draws in 0.99% of the air supplied to it. The remaining 99% consists of dilution air, whose purpose is to bring the concentration of exhaust gases down to the limit values.

Table 1

λ	Operating Hours	G, kg/(s·kW)	V, m³/(s·kW)	q/V	Percentage of the standard supply, %
1,3	full load	0,001100	0,000973	116,5	0,86
1,5	close to nominal	0,001269	0,001123	100,9	0,99
2,0	partial load	0,001692	0,001497	75,7	1,32
3,0	low load	0,002537	0,002246	50,5	1,98
5,0	idling	0,004229	0,003743	30,3	3,30

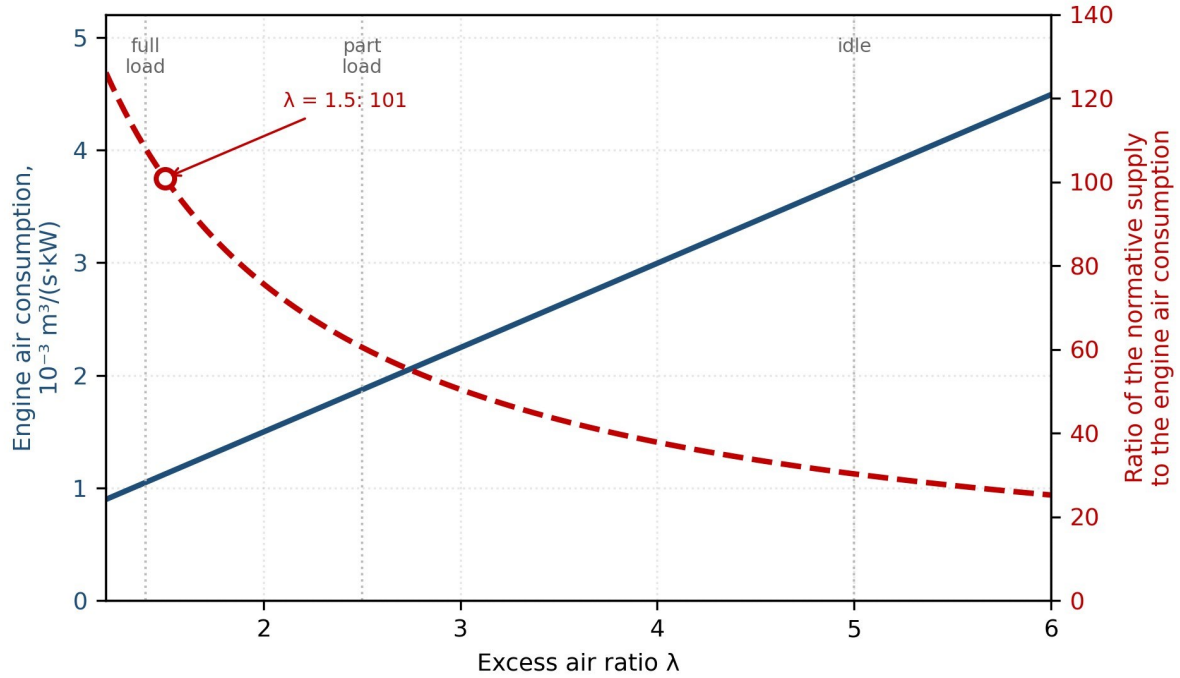


Fig. 1. Air flow through the engine per unit of power and the ratio of the standard air flow to this flow rate as a function of the air excess

This ratio depends significantly on operating conditions. At idle, where λ reaches 5, the ratio decreases to 30; that is, the engine consumes 3.3% of the supplied air. This means that the proportion of the mine atmosphere passing through the engine is highest precisely during standby and low-load conditions, which are characteristic of the underground mining cycle.

The robustness of the results with respect to the assumptions made is shown in Table 2.

Varying both parameters across their full ranges changes the proportion within the range of 0,94–1,13%. The value of "about one percent" is thus a stable characteristic, rather than a consequence of the specific choice of initial values.

Volume of atmosphere passing through the machine

The results are shown in Table 3.

Table 2

Sensitivity Analysis at λ=1.5

Variable parameter	Meaning	V, 10^{-3} m³/(s·kW)	q/V	Percentage, %
b_e, kg/(kW·h)	0,20	1,069	106,0	0,94
	0,21	1,123	100,9	0,99
	0,22	1,176	96,4	1,04
	0,24	1,283	88,3	1,13
ρ, kg/m³ (measured range [1])	1,08643	1,168	97,0	1,03
	1,13000	1,123	100,9	0,99
	1,15294	1,100	103,0	0,97

Table 3

Volume of mine atmosphere passing through the air supply system (λ=1,5, load factor 0,6)

Machine	Power, kW	Power under load: 066 kW	Flow rate, m³/h	Per 762-hour shift, m³
Centralized Computing Machine [1]	82,5	49,5	200	1441
CAT R1300G Loader-Hauler	121,4	72,8	294	2120
MT-431V Dump Truck	275,8	165,5	669	4816
Cat AD30 Dump Truck	304,0	182,4	737	5308

A 275.8 kW dump truck moves 4,816 m³ of mine air through its air supply system per shift. For comparison: this is equivalent to the volume of air in a 16.9 m² cross-section over a length of 285 m—in other words, during one shift, a single truck “pumps” through itself a volume of air equivalent to the contents of nearly 300 meters of a transport shaft.

Based on the fleet size used in the air demand calculation (ten units at 82.5 kW each with a load factor of 0.6), the airflow through the motors is 0.556 m³/s, or 2,001 m³/h; at 3,000 motor-hours per unit per year, this amounts to 6.00 million m³ per year. During the same period, 6.19 billion m³ passes through the mine (at a supply rate of 200.44 m³/s and fan operating hours of 8,577), meaning that 0.097% of the annual ventilation volume passes through the motors.

It is important to interpret this comparison correctly. A small proportion of the total mine volume does not imply low significance: what matters is not the proportion, but the absolute mass of dust accumulated in the filtration system, since the filter is a storage element rather than a flow-through one.

Dust Load on Filtration Systems

The results of the calculation according to (3) are presented in Table 4 and Figure 2.

At the background dust concentration documented in [6] for a mechanized non-ferrous metal mine—where no visible dust is present and operations are conducted near the measurement points—between 0.53 and 0.78 kg of dust enters the air intake system of a 275.8 kW dump truck per 1,000 operating hours. At a dust concentration of 10 mg/m³—a value typical for work near the face—the same vehicle receives 6.6 kg over the same period, which is 8.5–12.5 times more.

Table 4

Mass of dust entering the air supply system per 1,000 operating hours, g

Dust concentration, mg/m³	82,5 kW	121,4 kW	275,8 kW	304 kW
0,5	99	146	331	365
0,80–1,17 (Source: [6])	158–232	233–341	530–775	584–854
2,0	396	583	1324	1460
5,0	990	1457	3311	3650
10,0	1981	2915	6622	7299
20,0	3962	5830	13 244	14 598

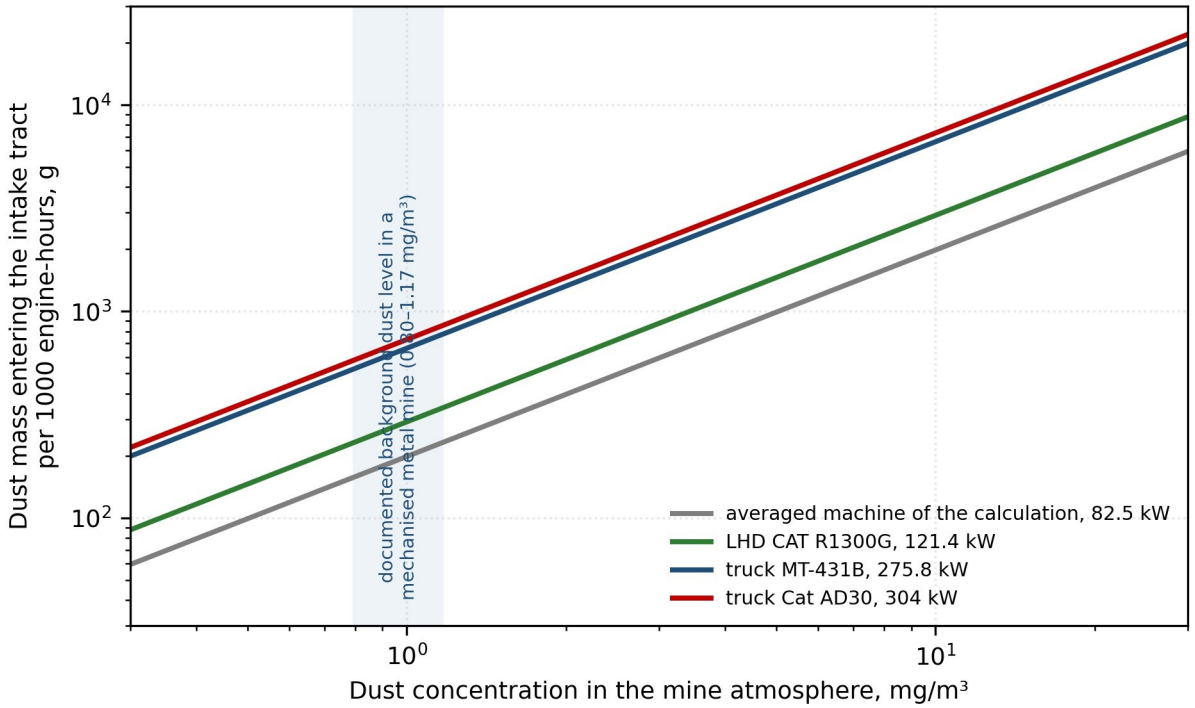


Fig. 2. Mass of dust entering the air supply system per 1,000 operating hours, as a function of dust concentration in the mine atmosphere. The shaded area represents the documented background dust concentration in a mechanized mine, according to [6]

It is important to note that the background value was obtained under the most favorable conditions possible: with no visible dust and no mining operations nearby. A machine operating at the face or traveling along a haulage tunnel behind another machine encounters significantly higher concentrations.

Maintenance Intervals for the Filtration System

The calculation results according to (4) are presented in Table 5 and Figure 3.

The resulting relationship is inversely proportional: a fortyfold range in concentrations (0.5–20 mg/m³) yields a fortyfold range in maintenance intervals. For a filter with a dust-holding capacity of 500 g, the interval ranges from 1,510 to 38 operating hours.

This leads to a practical conclusion that constitutes the main point of this study. The maintenance interval for the air supply system cannot be correctly determined based on a calendar or operating hours, since the parameter that determines it—atmospheric dustiness—varies widely across the mine and is not measured. A maintenance schedule based on an average value will prove excessive for machines operating in transport tunnels under background dust conditions and insufficient for machines operating near the working faces.

The existing standardization system does not cover this parameter from either perspective: Standard [7] specifies filter properties but not operating conditions; safety regulations and methods for calculating air demand [1–3] specify the air quality in the work area but not the air quality at the engine intake. There remains a gap between the two standardization systems, within which the parameter under consideration falls.

Table 5

Maintenance Intervals for the Filtration System of the MT-431V Dump Truck (flow rate 669 m³/h), operating hours

Dust concentration, mg/m³	M_f=200 g	M_f=500 g	M_f=1000 g
0,5	604	1510	3020
1,0	302	755	1510
2,0	151	378	755
5,0	60	151	302
10,0	30	76	151
20,0	15	38	76

Criterion for Dust Removal and Air Velocity

The results of the velocity analysis are presented in Table 6 and Figure 4.

In terms of dust removal, the situation is generally satisfactory: of the twenty-nine workings, only one fails to meet the minimum of 0,15 m/s established for other workings, and two do not reach 0,25 m/s. Both are located in the lower part of the mine—the "1" shaft in sections 81–93 and the "2" shaft in sections 94–95, where the air flow rate is 4,2 m³/s with cross-sectional areas of 23,8 and 33,2 m², respectively.

The following circumstance is worth noting. The dust removal criterion is based on keeping dust in suspension: the minimum velocity is set so that airborne dust is carried out of the tunnel rather than settling within it. From a human safety perspective, this is the correct approach—settled dust must be removed, while suspended dust is removed by a jet of air. However, for a machine operating in the same working face, the consequence is the opposite: the air in which dust is intentionally kept suspended is the very same air that enters the machine's air supply system.

This does not mean that the dust removal criterion is flawed: dust settling in the working face creates a reserve that is stirred up into the air in significantly higher concentrations when the machine passes through. The point is that the optimum based on the criterion of human safety and the optimum based on the criterion of machine service life do not coincide, and the latter criterion is not addressed at all in the existing system.

The inclined haulage shaft, through which all of the mine's ore is transported, has velocities ranging from 0,41 to 3,41 m/s, increasing toward the mouth of the shaft. It is precisely this section, as shown in a separate study of the same facility, that has the worst air quality parameters in the mine in terms of temperature and humidity; the fleet's heavy machinery operates through it at speeds close to their rated speeds.

Conclusions

It has been established that when the engine is operating near its rated conditions (λ = 1.5), the standard air supply exceeds the air flow

Table 6

Air velocities at measurement points in mine workings [1]

Indicator	Meaning
Number of survey stations in mine workings	29
Speed range, m/s	0,13–5,16
Median, m/s	2,38
Percentage of stands with a speed of less than 1 m/s	31 %
Velocities below 0.25 m/s (minimum for face operations)	2 (barrel "1," 81–93 — 0.18 m/s; barrel "2," 94–95 — 0.13 m/s)
Conditions below 0.15 m/s (the minimum for other workings)	1 (barrel "2" 94–95 — 0.13 m/s)
Speed range of the NTS 1-3 inclined conveyor chute, m/s	0,41–3,41

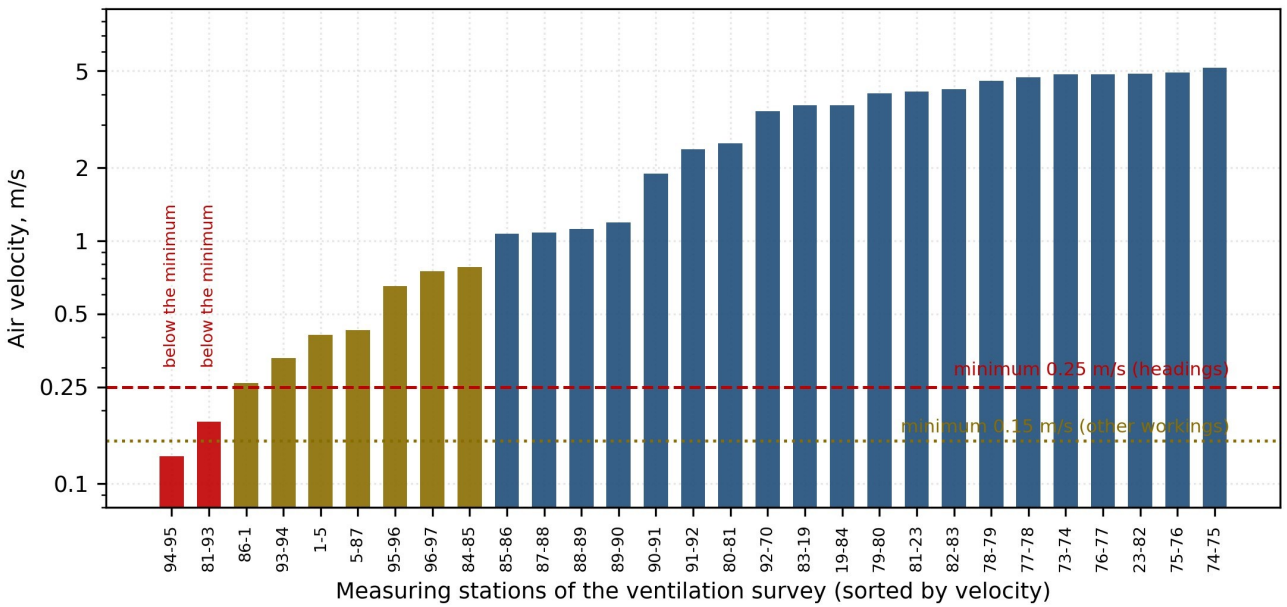


Fig. 4. Air velocities at twenty-nine measurement points in underground mine workings, compared with regulatory minimums

through the air intake system by a factor of 101: the engine draws in 0.99% of the air supplied to it. The remaining 99% consists of dilution air.

It has been shown that the obtained ratio is stable: variations in specific fuel consumption in the range of 0.20–0.24 kg/(kW·h) and in mine air density in the range of 1.086–1.153 kg/m³ (as measured in the mine) cause this ratio to vary between 0.94% and 1.13%.

It has been established that the proportion of mine air passing through the engine increases as the load decreases: at λ = 5 (idling), the ratio of the standard air supply to the air flow through the engine decreases from 101 to 30, while the proportion increases to 3.3%. The maximum thus occurs during idle and low-load conditions, which are characteristic of the underground operating cycle.

The volume of mine air passing through the air supply system has been calculated: a dump truck with a power of 275.8 kW and a load factor of 0.6 allows 669 m³/h to pass through, or 4,816 m³ per shift. A fleet of ten vehicles, used in the air demand calculation, passes 2,001 m³/h, which, at 3,000 operating hours per vehicle, amounts to 6.00 million m³ per year, or 0.097% of the mine's annual ventilation volume.

The dust load on the cleaning equipment has been determined: with a documented background dust concentration in the mechanized mine of 0.80–1.17 mg/m³, the air supply system of a 275.8-kW dump truck receives between 0.53 and 0.78 kg of dust per 1,000 operating hours; at a dust concentration of 10 mg/m³, this amounts to 6.6 kg; and at 20 mg/m³—13.2 kg.

An inversely proportional relationship has been established between the maintenance interval for the dust filter and the ambient dust concentration: for a filter element with a dust-holding capacity of 500 g, the interval ranges from 1,510 operating hours at 0.5 mg/m³ to 38 operating hours at 20 mg/m³. It follows that the maintenance interval for the air supply system cannot be correctly scheduled on a calendar basis or based on operating hours, since the parameter that determines it is not measured at the mine.

A discrepancy has been identified between two standardization systems: the international standard for intake air filtration equipment specifies product characteristics (capture efficiency, dust-holding capacity) but not operating conditions; safety regulations and methods for calculating air demand specify the air quality in the work area but not the air quality at the engine intake. Atmospheric dust content, as a parameter determining the service life of the air supply system, is not covered by either of them.

According to survey data from twenty-nine measurement points in underground mine workings, one does not meet the minimum velocity of 0.15 m/s and two do not reach 0.25 m/s; the median velocity is 2.38 m/s, with a range of 0.13–5.16 m/s.

Funding. This study was conducted without external funding.

Conflict of Interest. The author declares no conflict of interest.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the management and specialists of the gold mine for providing the raw data and facilitating the research.

References:

1. Conducting air-depression surveys in the underground workings of a gold mine, developing long-term ventilation schemes, and conducting research to determine the optimal ventilation scheme: Research Report 2026-254-101-VDS. — Navoi, 2025. — 52 pp.

2. Uniform Safety Rules for the Underground Mining of Ore, Non-Ore, and Alluvial Deposits: Approved by Resolution No. 09/YUB-23 of March 6, 2019.

3. Provisional Instructions for Calculating the Air Volume Required for Ventilation of Ore Mines. — Moscow, 1983.

4. Handbook on Mine Ventilation. — Moscow: Nedra, 1977.

5. Paluchamy, B., Mishra, D. P., & Panigrahi, D. C. "Airborne respirable dust in fully mechanized underground metalliferous mines—generation, health impacts, and control measures for cleaner production" // Journal of Cleaner Production. — 2021. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126524

6. Characterization and health risk assessment of airborne dust generated in a highly mechanized underground metalliferous mine // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. — 2024. — DOI: 10.1007/s40033-024-00656-1 Note: The list of authors is subject to inclusion on the publication page.

7. ISO 5011:2025. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors — Performance testing. — 5th ed. — Geneva: ISO, 2025.

8. Halim A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines — Are we using the correct values? — 2017. — Full text: DiVA repository, Luleå University of Technology, record 1134809. Note: The publication details of the collection must be clarified before submitting the article.

9. Cauda E. G., Bugarski A. D., Patts L. Diesel aftertreatment control technologies in underground mines: the NO_2 issue // 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 2010 / eds. Hardcastle S., McKinnon D. L. — Sudbury: MIRARCO, 2010. — pp. 17–24.

10. Bugarski A. D., Barone T. L. Diesel and welding aerosols in an underground mine // International Journal of Mining Science and Technology. — 2020. — Vol. 30, No. 4. — pp. 449–454. — DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.002

11. Bugarski, A. D., Ritter, D. A. "Advanced diesel powertrains for underground mining mobile equipment" // Mining, Metallurgy & Exploration. — 2025. — DOI: 10.1007/s42461-025-01201-8

12. Menendez-Cabo P., Garcia-Gonzalez H. Assessment of diesel engine exhaust levels in an underground mine before and after implementing diesel particulate filters (DPF) and selective catalytic reduction (SCR) systems // Clean Technologies. — 2025. — Vol. 7, No. 4. — Article 104. — DOI: 10.3390/cleantechnol7040104

13. 30 CFR § 57.5060. Limit on exposure to diesel particulate matter. — Code of Federal Regulations, USA.

14. Regulation 854 (Mines and Mining Plants) under the Occupational Health and Safety Act, Ontario, Canada. — URL: https://www.ontario.ca/page/ventilation-requirements-diesel-powered-equipment-underground-mines

15. Kenzy G. W., Ramani R. V. An international review of regulations for diesel-powered equipment in underground mines // Proceedings of the 2nd International Mine Ventilation Congress, Reno, Nevada, USA / ed. P. Mousset-Jones. — 1980. — pp. 175–190.



Махмудов Азамат – и.о. профессора кафедры «Горная электромеханика», Навоийский государственный горно-технологический университет, кандидат технических наук, доцент
E-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-1260-9433

Azamat Makhmudov – Acting Professor at the Department of Mining Electromechanics, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD, Associate Professor
E-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-1260-9433

Maxmudov Azamat – "Konchilik elektr mexanikasi" kafedrasi professori v.b., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari nomzodi, dotsent
E-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-1260-9433



Ахмедов Сойибжон Тожибоевич – ассистент кафедры «Горная электромеханика», Навоийский государственный горно-технологический университет
E-mail: axmedovs623@gmail.com
ORCID: 0009-0001-2699-4504

Soyibjon Tojiboyevich Akhmedov – Junior Lecturer at the Department of Mining Electromechanics, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: axmedovs623@gmail.com
ORCID: 0009-0001-2699-4504

Axmedov Soyibjon Tojiboyevich – "Konchilik elektr mexanikasi" kafedrasi assistenti, Navoiy davlat konchilikva texnologiyalar universiteti
E-mail: axmedovs623@gmail.com
ORCID: 0009-0001-2699-4504



УДК 621.671.22:620.193.96:681.5 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.9

ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГРУНТОВОГО НАСОСА С УЧЁТОМ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА

Кахаров С.К.[1], Ишназаров О.Х.[2]

[1]Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Республика Узбекистан
[2]Институт проблем энергетики АН РУз, Республика Узбекистан

Аннотация. *Решается научная задача управления частотно-регулируемым электроприводом грунтового насоса 8Гр8 (двигатель ВАО2-280L8, 110 кВт) гидротранспортной системы медеобогатительной фабрики в условиях прогрессирующего гидроабразивного износа. Построена связанная динамическая модель «износ–гидравлика–электропривод», в которой накопленный износ введён как фазовая переменная, влияющая на напорную характеристику и КПД насоса. Установлено, что закон износа выпуклый по относительной скорости (интенсивность $\propto s^m, m \approx 2{,}8$), а слежение за подачей при износе порождает положительную обратную связь «износ → скорость → износ», сокращающую ресурс. На основе вариационного анализа (неравенство Йенсена) показано, что при заданном объёме перекачки минимум накопленного износа достигается на максимально сглаженной траектории скорости, реализуемой буферизованным предиктивным управлением. Синтезировано экономическое предиктивное управление (EMPC), совместно минимизирующее энергозатраты и расход ресурса при ограничениях на подачу и мощность; сопряжённая переменная интерпретирована как теневая цена износа. Предложена иерархическая (двухтемповая) реализация: медленный ресурсный контур согласован с быстрым энергооптимальным предиктивным управлением потоком асинхронного двигателя (закон минимума потерь $\psi_2^* \propto \sqrt{|M|}$), а разделение масштабов обосновано методом сингулярных возмущений; робастное выполнение ограничения по подаче обеспечивается ужесточением уставки по верхней оценке износа. По модельной оценке ресурс возрастает на 9–10 %, удельное энергопотребление снижается на ≈5 % при гарантированной средней подаче*

Ключевые слова: *грунтовый насос, 8Гр8, гидроабразивный износ, медеобогатительная фабрика, частотно-регулируемый электропривод, ВАО2-280L8, экономическое предиктивное управление, EMPC, фазовая переменная износа, остаточный ресурс, положительная обратная связь, неравенство Йенсена*

GRUNT NASOSINING GIDROABRAZIV EYILISHINI HISOBGA OLGAN HOLDA CHASTOTA BILAN BOSHQARILADIGAN ELEKTR YURITMASINI PREDIKTIV BOSHQARISH

S.K. Kaxarov[1], O.X. Ishnazarov[2]

[1]MISIS Milliy tadqiqot texnologik universiteti Olmaliq filiali, O‘zbekiston Respublikasi
[2]O‘zR FA Energetika muammolari instituti, O‘zbekiston Respublikasi

Annotasiya. *Mis boyitish fabrikasining gidrotransport tizimidagi 8Gr8 grunt nasosi (VAO2-280L8 dvigateli, 110 kVt) chastota bilan boshqariladigan elektr yuritmasini progressiv gidroabraziv eyilish sharoitida boshqarish ilmiy masalasi yechilmoqda. To'plangan eyilish nasosning bosim xarakteristikasi va FIKga (foydali ish koeffitsiyentiga) ta'sir qiluvchi faza o'zgaruvchisi sifatida kiritilgan «eyilish–gidravlika–elektr yuritma» bog'langan dinamik modeli qurilgan. Eyilish qonuni nisbiy tezlikka nisbatan qavariq ($\propto s^m, m \approx 2{,}8$ intensivligi bilan) ekanligi, eyilish sharoitida sarfni kuzatib borish esa resursni qisqartiruvchi «eyilish → tezlik → eyilish» musbat teskari aloqasini keltirib chiqarishi aniqlangan. Variatsion tahlil (Yensen tengsizligi) asosida berilgan haydash hajmida to'plangan eyilishning minimumi buferlangan prediktiv boshqaruv orqali amalga oshiriladigan maksimal darajada tekislangan tezlik trayektoriyasida erishilishi ko'rsatilgan. Sarf va quvvatga qo'yilgan cheklovlar sharoitida energiya sarfi va resurs sarfini birgalikda minimallashtiruvchi iqtisodiy prediktiv boshqaruv (EMPC) sintez qilingan; qo'shma o'zgaruvchi eyilishning soya narxi sifatida talqin qilingan. Ierarxik (ikki tezlikli) amalga oshirish taklif etilgan: sekin resurs konturi asinxron dvigatel oqimini boshqaruvchi tez energiya-optimal prediktiv boshqaruv (yo'qotishlarni minimallashtirish qonuni $\psi_2^* \propto \sqrt{|M|}$) bilan muvofiqlashtirilgan, masshtablarning ajratilishi esa singulyar buzilishlar usuli bilan asoslangan; sarf bo'yicha cheklovning robast bajarilishi eyilishning yuqori bahosi bo'yicha ucmaєkani qattiqlashtirish orqali ta'minlanadi. Model bahosiga ko'ra, kafolatlangan o'rtacha sarfda resurs 9–10 % ga oshadi, solishtirma energiya sarfi esa taxminan 5 % ga kamayadi.*

Kalit so‘zlar: *grunt nasosi, 8Gr8, gidroabraziv eyilish, mis boyitish fabrikasi, chastota bilan boshqariladigan elektr yuritma, VAO2-280L8, iqtisodiy prediktiv boshqaruv, EMPC, eyilishning faza o'zgaruvchisi, qoldiq resurs, musbat teskari aloqa, Yensen tengsizligi*

PREDICTIVE CONTROL OF THE VARIABLE-FREQUENCY DRIVE OF THE 8GR8 SLURRY PUMP UNDER HYDROABRASIVE WEAR (COPPER CONCENTRATOR OF JSC «ALMALYK MMC»)

S.K. Kakharov[1], O.Kh. Ishnazarov[2]

[1]Almalyk Branch of the National Research Technological University "MISIS", Republic of Uzbekistan
[2]Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Abstract. *The paper solves the problem of controlling the variable-frequency drive of the 8Gr8 slurry pump (VAO2-280L8 motor, 110 kW) of the hydrotransport system of the copper concentrator under progressive hydroabrasive wear. A coupled «wear–hydraulics–drive» dynamic model is developed in which the accumulated wear is introduced as a state variable affecting the head-capacity curve and the pump efficiency. It is shown that the wear law is convex in the relative speed (intensity $\propto s^m$, $m \approx 2.8$), and that throughput-tracking under wear generates a destabilising positive feedback «wear → speed → wear» that shortens the service life; a closed-form expression for the remaining useful life is obtained. By a variational argument (Jensen's inequality) it is proved that, for a prescribed pumped volume, the minimum accumulated wear is attained on the smoothest feasible speed trajectory, realised by buffered predictive control. An economic model predictive controller (EMPC) is synthesised that jointly minimises energy and life consumption subject to throughput and power constraints; the costate is interpreted as the shadow price of wear, and a terminal remaining-life penalty provides recursive feasibility. A hierarchical two-time-scale realisation is proposed in which the slow life-management loop is coordinated with a fast energy-optimal predictive flux controller of the induction motor (loss-minimising law $\psi_2^* \propto \sqrt{|M|}$); the time-scale separation is justified by singular-perturbation theory, and robust throughput satisfaction is ensured by tightening the speed setpoint with respect to an upper wear estimate. The wear state, being unmeasured, is reconstructed by a Kalman estimator closing a condition-based predictive loop. Model-based estimates show a 9–10 % increase in service life and a ≈5 % reduction in specific energy consumption at guaranteed average throughput.*

Keywords: *slurry pump, 8Gr8, hydroabrasive wear, copper concentrator, variable-frequency drive, VAO2-280L8, economic model predictive control, EMPC, wear state variable, remaining useful life, positive feedback, Jensen's inequality*

Введение

Постановка проблемы. Гидротранспорт продуктов медного обогащения обслуживается грунтовыми насосами, в том числе 8Гр8 (Гр 400/40) с приводом от взрывозащищённого асинхронного двигателя ВАО2-280L8 (110 кВт, 750 об/мин). Перекачивание кварцсодержащей пульпы (микротвёрдость частиц до 9000 МПа) вызывает интенсивный гидроабразивный износ рабочего колеса, защитного диска и улитки, при котором деградируют напорная характеристика и КПД, а наработка на отказ ограничена 1200–1500 ч.

Износ, энергопотребление и подача связаны через скорость вращения: интенсивность износа возрастает по степенному закону от относительной скорости ($s^m, m \approx 2{,}5 \ldots 3{,}2$), тогда как подача растёт лишь линейно. При нерегулируемом приводе (прямой пуск) скорость фиксирована, агрегат не адаптируется к нагрузке и при износе выходит в зону перегрузки. При наивном частотном регулировании со слежением за подачей компенсация падения напора достигается повышением скорости, что усиливает износ и порождает положительную обратную связь «износ → скорость → износ». Научная задача состоит в синтезе закона управления скоростью, который при гарантированной подаче минимизирует совокупные затраты энергии и ресурса, учитывая указанную обратную связь и выпуклость закона износа.

Анализ достижений и публикаций. Закономерности эрозионного разрушения потоком частиц установлены Finnie [1] и Bitter [2]; обзор Truscott [3] фиксирует степенную зависимость износа от скорости (m ≈ 2,5…3,2). Эмпирические соотношения износа грунтовых насосов получены Walker и Bodkin [4], обобщённое описание гидротранспорта — в [5], CFD-прогноз эрозии — в [6, 7]. Теория предиктивного управления изложена в [8]; экономическое предиктивное управление (EMPC) и его устойчивость — в [9, 10].

Вместе с тем в известных работах износ рассматривается изолированно от закона управления приводом: динамика накопления износа не вводится в модель управления как фазовая переменная, а энергетический и ресурсный критерии не оптимизируются совместно. Это оставляет нерешённой задачу предиктивного управления скоростью с учётом ресурса насоса.

Научная новизна. 1) Построена связанная динамическая модель «гидроабразивный износ – гидравлика – электропривод» с износом как фазовой переменной. 2) Доказано наличие положительной обратной связи «износ → скорость» при слежении за подачей и получено выражение остаточного ресурса. 3) На основе неравенства Йенсена установлено, что минимум накопленного износа при заданном объёме перекачки достигается сглаживанием траектории скорости. 4) Синтезировано экономическое предиктивное управление с сопряжённой переменной как теневой ценой износа и терминальным ресурсным ограничением. 5) Предложен замкнутый условие-ориентированный контур с оцениванием состояния износа. 6) Предложена иерархическая двухтемповая структура, согласующая ресурсный EMPC с энергооптимальным предиктивным управлением потоком двигателя (закон минимума потерь); разделение масштабов обосновано методом сингулярных возмущений. 7) Сформулирована робастная постановка, гарантирующая подачу и вероятностный ресурс при неопределённости параметров износа.

Связанная модель «износ – гидравлика – электропривод». Управляющее воздействие — относительная скорость $s = n/n_{\text{ном}}$ (через преобразователь частоты). Накопленный износ δ принимается фазовой переменной с выпуклым по скорости законом нарастания:

$$\frac{d\delta}{dt} = \kappa s^m, \tag{1}$$

где к — оценочный коэффициент абразивности режима (поглощает Соб, ρтв, φ(α)). Напор насоса и его деградация описываются параметрической характеристикой с износозависимыми коэффициентами:

$$H_{\text{п}} = A(\delta)s^2 - B(\delta)Q^2 \tag{2}$$

$$A(\delta) = A_0(1 - a_\delta \cdot \delta), B(\delta) = B_0(1 + b_\delta \cdot \delta), \quad (3)$$

$$\eta_н(\delta) = \eta_0(1 - e_\delta \cdot \delta) \quad (4)$$

При характеристике сети $H_C = H_{CT} + R \cdot Q^2$ рабочая подача определяется аналитически:

$$Q(s,\delta) = \sqrt{\frac{A(\delta)s^2 - H_{ст}}{B(\delta) + R}}. \quad (5)$$

Потребляемая из сети мощность и удельное энергопотребление по твёрдой фазе:

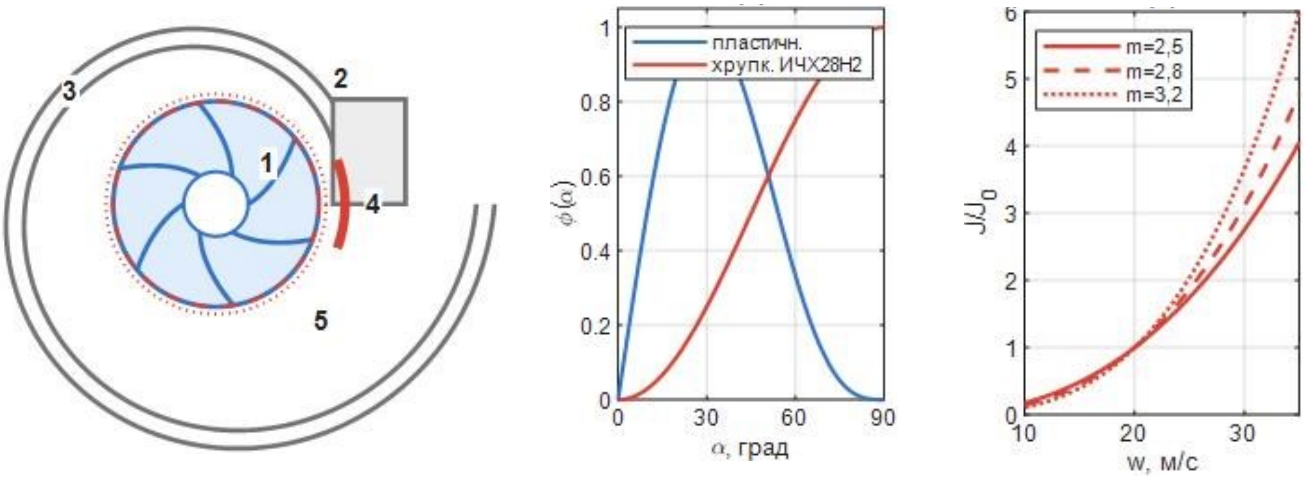
$$P_1 = \frac{\rho_{гс} g Q H_c}{\eta_н \eta_{пч}}, \qquad e_{уд} = \frac{P_1}{Q C_{об} \rho_{тв}}, \quad (6)$$

где $\eta_{пч}$ – КПД преобразователя частоты совместно с двигателем. Соотношения (1)–(4) образуют управляемую систему с состоянием δ и входом S; параметры модели (оценочные) приведены в (табл. 1), схема зон износа — на рис. 1.

Таблица 1

Параметры связанной модели агрегата 8Гр8 / ВАО2-280L8

Параметр	Обозначение	Значение
Номинальные подача / напор	$Q_{ном} / H_{ном}$	400 / 40
Мощность двигателя ВАО2-280L8	$P_{ном}$	110 кВт
Коэффициенты напора (нов.)	A_0 / B_0	48 / $5 \cdot 10^{-5}$
Сеть: статич. напор / сопротивление	$H_{ст} / R$	22 / $1{,}125 \cdot 10^{-4}$
Деградация: напор / крутизна / КПД	$a_\delta / b_\delta / e_\delta$	0,012 / 0,030 / 0,019
Коэф. износа при s =1	κ	$4{,}29 \cdot 10^{-3}$ мм/ч
Предельный износ / показатель	$\delta_{пред} / m$	6 мм / 2,8
КПД преобр.+двигателя	$\eta_{пч}$	0,90



а) б) в)

Рис. 1. Схема проточной части насоса 8Гр8 с зонами гидроабразивного износа: 1 – рабочее колесо; 2 – защитный диск; 3 – улитка; 4 – язык улитки; 5 – уплотнительные щели, и зависимости φ(α), J(w)

На рис. 1 локализованы зоны преимущественного износа (рабочее колесо, защитный диск, язык улитки, уплотнительные щели). Угловая функция φ(α) для хрупкого сплава ИЧХ28Н2 максимальна при $\alpha \to 90°$, что объясняет разрушение в области нормального натекания потока, тогда как для пластичных материалов максимум смещён к $\alpha \approx 20 \ldots 30°$. Степенная зависимость $J \propto w^m$ $(m = 2{,}5 \ldots 3{,}2)$ демонстрирует высокую чувствительность износа к скорости и служит физическим обоснованием частотного регулирования.

Методы

Анализ режимов и синтез предиктивного управления.

Положительная обратная связь и остаточный ресурс.

Слежение за заданной подачей Qтр определяет скорость из условия $Q(s,\delta) = Q_{тр}$:

$$s_{\text{тр}}(\delta) = \sqrt{\frac{(B(\delta)+R)Q_{\text{тр}}{}^2 + H_{\text{ст}}}{A(\delta)}} \qquad (7)$$

Поскольку A(δ) убывает, а B(δ) растёт с износом, $s_{\text{тр}}(\delta)$ монотонно возрастает; подстановка в (1) даёт замкнутую самоускоряющуюся динамику и остаточный ресурс:

$$\frac{d\delta}{dt} = \kappa[s_{\text{тр}}(\delta)]^m, \qquad (8)$$

$$RUL = \frac{1}{\kappa}\int \frac{d\delta}{\left[s_{\text{тр}}(\delta)\right]^m}. \qquad (9)$$

Численно при удержании номинальной подачи (*Qтр*=400м3/ч) ресурс сокращается до 1303 ч против 1400 ч для нерегулируемого режима, а потребляемая мощность достигает Рном уже при наработке *t*≈857 ч (рис. 8), что подтверждает дестабилизирующий характер обратной связи.

Минимизация износа сглаживанием скорости (вариационный результат)

Пусть за горизонт требуется переместить объём $V = \int Q\,dt$ при наличии буферной ёмкости (зумпфа), допускающей отклонение мгновенной подачи. Накопленный износ $\int \kappa\, s^m\, dt$ выпукло зависит от $s(\mathrm{m} > 1)$. По неравенству Йенсена для любой допустимой траектории с заданным средним:

$$\langle s^m \rangle \geq \langle s \rangle^m \qquad (10)$$

то есть минимум износа достигается на максимально сглаженной (в пределе — постоянной) траектории скорости. Второй порядок даёт величину выигрыша:

$$\langle s^m \rangle - \langle s \rangle^m \approx \frac{1}{2} m(m-1)\langle s \rangle^{m-2} Var(s). \qquad (11)$$

Относительное снижение износа пропорционально дисперсии профиля скорости и растёт с показателем m, что обосновывает буферизованное предиктивное управление как средство сглаживания при колебаниях питания фабрики (рис. 2).

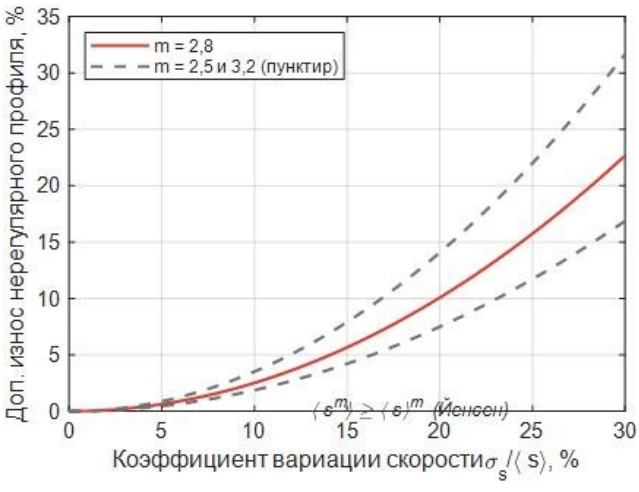


Рис. 2. Дополнительный износ нерегулярного скоростного профиля относительно сглаженного при одинаковой средней скорости в функции коэффициента вариации σs/⟨s⟩ для разных m

На рис. 2 показан дополнительный износ нерегулярного скоростного профиля, относительно сглаженного при одинаковой средней скорости. Согласно (10)–(11) превышение пропорционально квадрату коэффициента вариации скорости и растёт с показателем m: при $\sigma s/\langle s \rangle = 15 \ldots 20\ \%$ и $m = 2{,}8$ перерасход ресурса составляет несколько процентов, что обосновывает сглаживание скорости буферизованным предиктивным управлением.

Экономическое предиктивное управление (EMPC)

На приёмном горизонте T минимизируется совокупный функционал «энергия + ресурс» при ограничениях по подаче, мощности и скорости:

$$J = \int (c_э P_1 + c_и \kappa s^m)dt + \varphi(\delta(t+T)) \qquad (12)$$

при $\delta = \kappa s^m, Q(s,\delta) \geq Q_{\text{тр}}, P_1(s,\delta) \leq P_{\text{ном}}, s \in [s_{\text{мин}}, s_{\text{макс}}]$, где $c_э$ – цена энергии, $c_и$ – удельная стоимость ресурса, $\varphi(\cdot)$ — терминальный штраф остаточного ресурса. Гамильтониан и сопряжённое уравнение:

$$H = c_э P_1 + (c_и + \lambda)\kappa s^m, \qquad (13)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = -c_э \frac{\partial P_1}{\partial \delta}, \quad \lambda(t_f) = \varphi'\left(\delta(t_f)\right). \qquad (14)$$

Так как $\partial P_1/\partial\delta > 0$, сопряжённая переменная $\lambda \geq 0$ аккумулирует будущий энергетический штраф текущего износа и играет роль его теневой цены — предиктивная составляющая управления. Условие стационарности $\partial H/\partial s = 0$ определяет оптимальную скорость; при активном ограничении подачи оптимум совпадает с минимальной допустимой скоростью, обеспечивающей Q_{TP}. Реализация – в форме скользящего горизонта (дискретно):

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \kappa {s_k}^m \Delta t. \qquad (15)$$

Терминальный штраф φ(δ) выбирается монотонным по δ, что вместе с монотонностью δ≥0 обеспечивает рекурсивную допустимость и роль ресурсного бюджета как функции запаса (по [9, 10]).

Замкнутый условие-ориентированный контур

Состояние износа δ непосредственно не измеряется; оно оценивается фильтром Калмана по доступным сигналам (напор, мощность, вибрация) с коррекцией модели прогноза, после чего оценка δ подаётся в EMPC. Тем самым реализуется условие-ориентированное предиктивное управление, адаптирующее режим к фактической деградации проточной части.

Иерархическое и робастное предиктивное управление.

Связь ресурсного критерия с электромагнитными процессами двигателя реализуется двухконтурной (двухтемповой) структурой, обоснованной разделением масштабов времени: электромагнитная постоянная ротора $T_2 = L_2/R_2$ составляет десятки миллисекунд, тогда как характерное время износа – сотни часов, так что малый параметр $\varepsilon = T_2/T_{изн} \ll 1$. По методу сингулярных возмущений [11] система распадается на медленную подсистему износа и быструю электромагнитную подсистему.

Медленный контур (ресурсный EMPC).

На медленном масштабе двигатель — безынерционное звено, отрабатывающее требуемый момент; внешний EMPC (раздел 5) формирует оптимальную уставку скорости s^*, балансируя энергозатраты и ресурс при ограничениях.

Быстрый контур (энергооптимальное предиктивное управление потоком).

На быстром масштабе предиктивный контур (FCS-MPC / предиктивное управление током) реализует s^* при минимуме электриче-

ских потерь. В обозначениях с индексом 1 (статор) и 2 (ротор) момент $M = k_M \cdot \psi_2 \cdot i_1 q$, а суммарные управляемые потери:

$$\Delta P = \frac{3}{2} R_1 \left(\frac{{\psi_2}^2}{{L_м}^2} + {i_{1q}}^2 \right) + \frac{3}{2} R_2 {i_{1q}}^2 + k_{ст} {\omega_1}^2 {\psi_2}^2. \quad (16)$$

Минимизация ΔP по ψ_2 при заданном моменте даёт энергооптимальный поток (закон минимума потерь):

$$\psi_2^* = \left[\frac{3 {L_м}^2 M^2 (R_1 + R_2)}{{k_M}^2 (3R_1 + 2{L_м}^2 k_{ст} {\omega_1}^2)} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (17)$$

то есть $\psi_2^* \propto \sqrt{|M|}$ с ослаблением поля при росте скорости (вследствие потерь в стали). Удельное энергопотребление $e_{уд}$ внешнего контура достигается именно при удержании $\psi_2 = \psi_2^*$ быстрым предиктивным контуром (рис. 6).

Робастность к неопределённости износа.

Коэффициент к и параметры деградации известны с погрешностью ($\kappa \in [\kappa_{min}, \kappa_{max}]$) выполнение ограничения по подаче обеспечивается ужесточением установки скорости, по верхней оценке, износа, а планирование ремонта — вероятностным ограничением остаточного ресурса:

$$s \geq s_{тр}(\delta_{оц} + \Delta\delta), \; P(RUL \geq T_{план}) \geq 1 - \beta, \quad (18)$$

где Δδ – гарантированная граница ошибки оценивания и прогноза, β – допустимый риск; задача решается по κmax (наихудший случай) в духе трубчатого робастного MPC [12].

Структура оптимального управления

Применение принципа максимума показывает, что оптимальная траектория скорости составлена из дуги с активным ограничением подачи ($s=s_{тр(δ)}$)) и дуги ограничения мощности ($P_1 = P_{ном}$) при высоком износе; сопряжённая переменная λ определяет момент назначения ремонта (условие трансверсальности). Тем самым предиктивное управление объединяет энергооптимальность, ресурсосбережение и гарантию подачи в единой иерархической схеме [8–13].

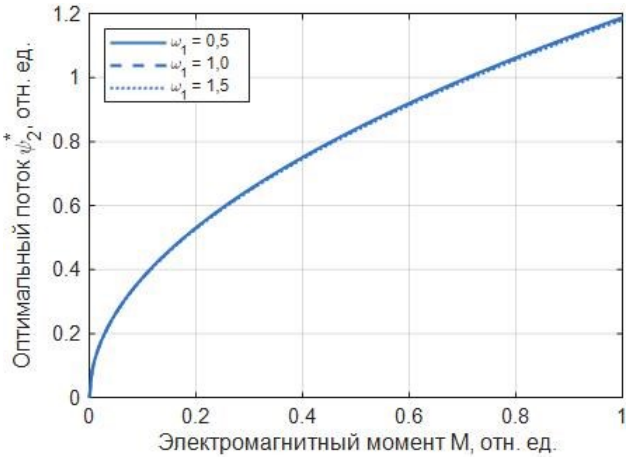


Рис. 3. Энергооптимальный поток ψ₂*(M, ω₁) (закон минимума потерь): зависимость оптимального потока от момента при разных скоростях

На рис. 3 приведён закон минимума потерь $\psi_2^*(M, \omega_1)$: оптимальный поток растёт как $\sqrt{|M|}$ и снижается с увеличением скорости вследствие потерь в стали (ослабление поля). Удержание $\psi_2 = \psi_2^*$ быстрым контуром обеспечивает достижение расчётного удельного энергопотребления внешнего контура.

Результаты и обоснование

Сопоставление трёх стратегий при колеблющемся питании фабрики (среднее 376 м³/ч) приведено в (табл. 2); смещение характеристики Q–H — на рис. 4; траектории износа и ресурс — на рис. 5, режимные ограничения и зависимости еуд(s), δ(s) — на рис. 6.

Таблица 2

Сравнение стратегий управления (модельная оценка, новый насос)

Стратегия	⟨s⟩	Ресурс, ч	$e_{уд}$, кВт·ч/т	Q, м³/ч
ПП (без ПЧ), s = 1	1,000	1400	0,525	400*
ЧРП, слежение за подачей	0,969	1519	0,504	376
Буферизованное ЕМРС	0,968	1534	0,497	376

** с избытком (рециркуляция). Относительно прямого пуска ЕМРС увеличивает ресурс на 9,6 % и снижает удельное энергопотребление на 5,3 % при гарантированной средней подаче.*

Результаты показывают, что выигрыш обеспечивается двумя механизмами: исключением избыточной подачи (снижение средней скорости относительно номинала) и сглаживанием скоростного профиля (по (8), (9)). В режиме удержания номинала ЕМРС ограничивает рост скорости условием $P1 \leq P_{ном}$, допуская управляемое снижение подачи на 2–3 % вместо кубического по скорости прироста износа, что предотвращает перегрузку привода.

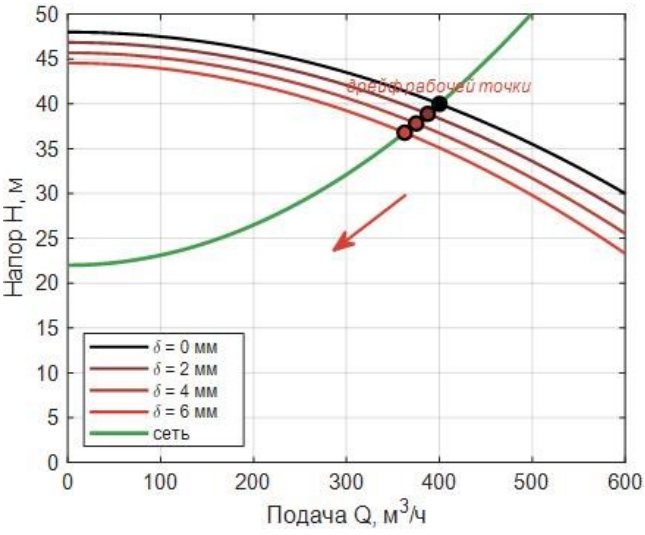


Рис. 4. Смещение напорной характеристики Q–H по мере наработки и дрейф рабочей точки относительно характеристики сети

На рис. 4 прослеживается смещение напорной характеристики по мере накопления износа: снижение A(δ) и рост B(δ) опускают и спрямляют кривую Q–H. Рабочая точка, определяемая пересечением с характеристикой сети $H_C = H_{СТ} + R \cdot Q^2$, дрейфует вниз-влево от (400; 40) к (≈371; 37,5), что отражает совместную потерю напора и подачи.

На рис. 5 сопоставлены траектории накопления износа в режиме удержания номинальной подачи. Слежение за подачей даёт наиболее крутую кривую вследствие положительной обратной связи «износ → скорость», сокращая ресурс до ≈1303 ч; экономи-

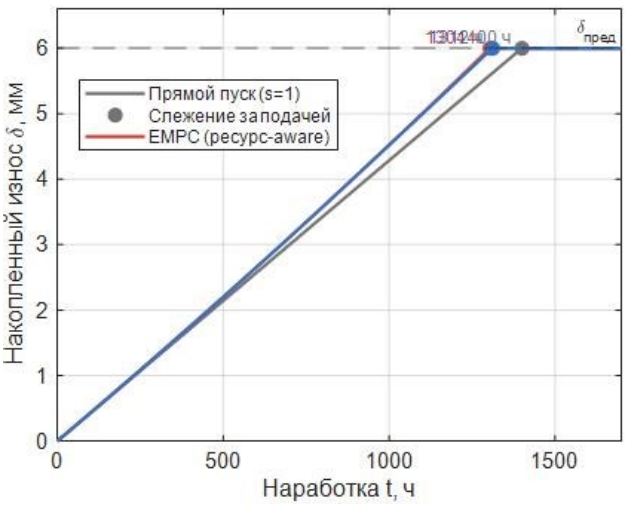


Рис. 5. Траектории накопления износа δ(t) и остаточный ресурс для стратегий: прямой пуск, слежение за подачей, экономическое предиктивное управление

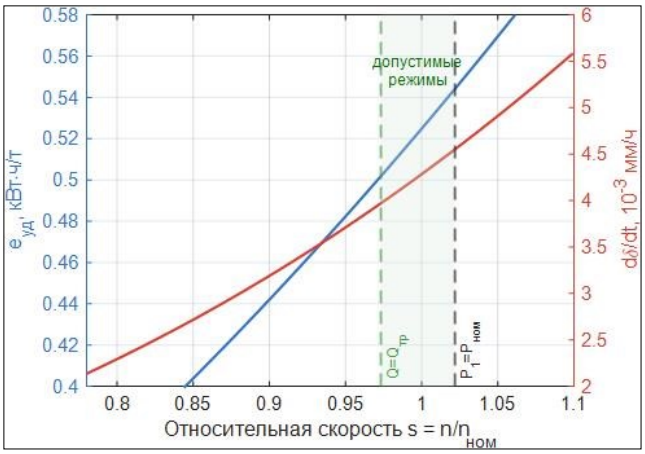


Рис. 6. Удельное энергопотребление $e_{уд}$ интенсивность износа δ в функции относительной скорости s с областью допустимых режимов (Q ≥ Qтр, P_1 ≤ Pном)

ческое предиктивное управление, ограничивая скорость условием P1 ≤ Pном и допуская управляемое снижение подачи на 2–3 %, отодвигает достижение δпред и предотвращает перегрузку; нерегулируемый режим s = 1 формально дольше сохраняет ресурс, но не компенсирует падение напора.

На рис. 6 удельное энергопотребление еуд и интенсивность износа δ=ksm монотонно возрастают со скоростью, причём износ – по кубическому закону против близкого к линейному роста энергозатрат. Область допустимых режимов ограничена слева условием подачи $Q \geq Q_{TP}$, справа – мощностью $P \leq P_{ном}$; при активном ограничении подачи оптимум лежит на её левой границе (минимально допустимая скорость), что и реализует EMPC.

Заключение

1. Построена связанная модель «гидроабразивный износ – гидравлика – электропривод» с износом как фазовой переменной, влияющей на напор и КПД насоса 8Гр8.

2. Установлено, что слежение за подачей при износе порождает положительную обратную связь «износ → скорость → износ»; получено выражение остаточного ресурса, а при удержании номинала ресурс сокращается с 1400 до 1303 ч с выходом в перегрузку при t ≈ 857 ч.

3. На основе неравенства Йенсена доказано, что минимум накопленного износа при заданном объёме перекачки достигается сглаживанием траектории скорости; выигрыш растёт с дисперсией профиля и показателем m.

4. Синтезировано экономическое предиктивное управление с сопряжённой переменной как теневой ценой износа и ресурсным терминальным ограничением; по оценке достигается рост ресурса на 9–10 % и снижение удельного энергопотребления на ≈5 % при гарантированной подаче.

5. Предложена иерархическая двухтемповая реализация, согласующая ресурсный EMPC с энергооптимальным предиктивным управлением потоком двигателя ($\psi_2^* \propto \sqrt{|M|}$) и обоснованная методом сингулярных возмущений, а также робастная постановка с гарантией подачи и вероятностным ресурсом. Перспектива — экспериментальная калибровка модели износа и реализация условие-ориентированного контура.

Библиографический список:

1. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // Wear. – 1960. – Vol. 3, No. 2. – P. 87–103.
2. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part I // Wear. – 1963. – Vol. 6, No. 1. – P. 5–21.
3. Truscott G.F. A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery // Wear. – 1972. – Vol. 20, No. 1. – P. 29–50.
4. Walker C.I., Bodkin G.C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps. Part 1: side-liners // Wear. – 2000. – Vol. 242, No. 1–2. – P. 140–146.
5. Wilson K.C., Addie G.R., Sellgren A., Clift R. Slurry Transport Using Centrifugal Pumps. – New York: Springer, 2006. – 432 p.
6. Pagalthivarthi K.V., Gupta P.K., Tyagi V., Ravi M.R. CFD prediction of erosion wear in centrifugal slurry pumps // Journal of Computational Multiphase Flows. – 2011. – Vol. 3, No. 4. – P. 225–245.
7. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
8. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. – 2nd ed. – Madison: Nob Hill Publishing, 2017. – 770 p.
9. Ellis M., Durand H., Christofides P.D. A tutorial review of economic model predictive control methods // Journal of Process Control. – 2014. – Vol. 24, No. 8. – P. 1156–1178.
10. Diehl M., Amrit R., Rawlings J.B. A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2011. – Vol. 56, No. 3. – P. 703–707.
11. Kokotović P.V., Khalil H.K., O'Reilly J. Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design. – Philadelphia: SIAM, 1999. – 371 p.

12. Mayne D.Q., Seron M.M., Raković S.V. Robust model predictive control of constrained linear systems with bounded disturbances // Automatica. – 2005. – Vol. 41, No. 2. – P. 219–224.
13. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 711 p.



Кахаров Сергей Каримович – заведующий кафедрой «Горное дело», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», кандидат технических наук, доцент
E-mail: kaharovvserj8188@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0433-3186

Sergey Karimovich Kaharov – Head of the Department of Mining, Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISiS, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: kaharovvserj8188@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0433-3186

Kaharov Sergey Karimovich – «Konchilik ishi» kafedrasi mudiri, «MISIS» Milliy texnologiya tadqiqot universiteti Olmaliq filiali, texnika fanlari nomzodi, dotsent
E-mail: kaharovvserj8188@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0433-3186



Ишназаров Ойбек Хайруллаевич – заместитель директора по науке, Институт проблем энергетики АН РУз, доктор технических наук, профессор
E-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3580-9793

Oybek Khayrullayevich Ishnazarov – Deputy Director for Science, Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3580-9793

Ishnazarov Oybek Xayrullaevich – Fan bo‘yicha direktor o‘rinbosari, O‘zR FA Energetika muammolari instituti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3580-9793

UO‘K 67.08:347.218.1 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.10

IZOSIYANAT GURUHLI URETAN OLIGOMERLARINING KONSENTRASIYLARINI POLIKONDENSATSIYALANISH MEXANIZMIGA TA’SIRNI O‘RGANISH

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Jo‘raev , R.K. Shokirov

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O’zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Ushbu maqolada izosiyanat guruhiga ega uretan oligomerlarining sintezi, makromolekulyar tuzilishi hamda fizik-kimyoviy xossalarining izosiyanat va poliol nisbatiga bog‘liq ravishda o‘zgarish qonuniyatlari tadqiq qilindi. Oligomerlar bosqichma-bosqich polikondensatsiyalanish reaksiyasi orqali sintez qilinib, tarkibida 65, 67, 69 va 71 massa qism metilendifenildiizosiyanat (90°C), mos ravishda 30, 28, 26 va 24 massa qism adipin kislotasining etilenglikol efiri (75°C) hamda barcha namunalar uchun 5 massa qism butandiol-1,4 (55 °C) xaroratli zanjir uzaytiruvchi qo‘llanildi. Polikondensatsiyalanish jarayoni 40 min davomida 3600 ayl/min aralashtirish tezligida olib borildi buning natijasida suyuqlanma tarkibidagi turli gazlar, namlik hamda havo pufakchalarini degazatsiyalash orqali yuqori darajada gomogen oligamer aralashmalari tayyorlandi. Tayyorlangan oligamer aralashmalari quyi bosim 1,8-2,5 Pa ostida maxsus linya orqali kerakli shakldagi qoliplarga quyildi. Qolip bilan birgalikdagi namularni qotirshda 105-115oC xaroratda 22-24 soat vaqt oralig‘ida qotiriladi, yarim tayyor namunalarni kristallanishi uchun 80-90oC haroratli pechda 72-96 soat davomida ushlab turildi hamda namunalar tayyorlandi. Ushbu namunalarning molekulyar tuzilishi infraqizil spektr tahlili yordamida toza, chiqindi, qayta ishlangan poliuretan namunalarini hosil qiluvchi turli bog‘lar tavsiflanib, uretan (–NH–CO–O–), amid N–H (3300–3350 cm⁻¹), karbonil C=O (1700–1730 cm⁻¹) hamda efir guruhlarining C–O–C (1050–1150 cm⁻¹) valent tebranishlariga tegishli yutilish chiziqlari mavjudligi aniqlandi. Erkin izosiyanat guruhi mavjudligi isbotlandi hamda erkin izosiyanat guruhiga xos 2270 cm⁻¹ diapazonidagi yutilish intensivligining kamayishi reaksiya davomida –NCO guruhlarining poliol gidroksil guruhlari bilan yuqori darajada reaksiyaga kirishganligini o‘rganildi. Spektral natijalar izosiyanat miqdorining ortishi bilan vodorod bog‘lari zichligi va qattiq segmentlarning ulushi oshishini, buning natijasida makromolekulyar tarmoqning tartibliligi kuchayishini ko‘rsatdi. UCSF ChimeraX molekulyar modellashtirish usullari asosida toza, chiqindi va qayta ishlangan namunalarning funksional guruhlari, reaksion faolligi, makromolekulyar zanjirlarning o‘sish kinetikasi hamda uretan bog‘lari hosil bo‘lishining fazoviy mexanizmi tahlillari o‘rganildi. Modellashtirish natijalari eksperimental IQ-spektr ma'lumotlari bilan taqqoslandi, poliuretan sintezida MDI miqdorining ortishi faol markazlar hosil bo‘lishi, zanjir uzaytiruvchida esa makromolekulalarning fazoviy konfiguratsiyasi va segmentlararo o‘zaro ta'sirlar barqarorlashishi tahlil qilindi.*

Kalit so‘zlar: *spektral tahlil, funksional guruhlar, valent tebranish, izosiyanat, oligomer, adipin kislotasining etilenglikol eferi, poliuretan, diizosiyanat, yutilish sohasi, 1,4-butandiol, struktura.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИЗОЦИАНАТСОДЕРЖАЩИХ УРЕТАНОВЫХ ОЛИГОМЕРОВ НА МЕХАНИЗМ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ

Мухиддинов Б.Ф., Шодиев А. Ф., Жураев Ш.Т., Шокиров Р.К.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной работе исследованы закономерности влияния соотношения изоцианатного компонента и полиола на синтез, макромолекулярную структуру и физико-химические свойства изоцианатсодержащих уретановых олигомеров. Олигомеры были синтезированы методом ступенчатой поликонденсации с использованием 65, 67, 69 и 71 мас. ч. метилендифенилдиизоцианата (90 °C), соответственно 30, 28, 26 и 24 мас. ч. этиленгликолевого эфира адипиновой кислоты (75 °C), а также 5 мас. ч. 1,4-бутандиола (55 °C), применяемого в качестве удлинителя цепи для всех исследуемых образцов. Процесс поликонденсации осуществляли в течение 40 мин при скорости перемешивания 3600 об/мин, что обеспечило эффективную дегазацию реакционной массы, удаление растворённых газов, влаги и воздушных включений, а также получение высокооднородных олигомерных композиций. Полученные олигомерные смеси заливали в формы требуемой конфигурации через специальную технологическую линию при пониженном давлении 1,8–2,5 Па. Отверждение образцов проводили совместно с формами при температуре 105–115 °C в течение 22–24 ч, после чего полуфабрикаты подвергали дополнительной термообработке при 80–90 °C в течение 72–96 ч для завершения процессов кристаллизации и формирования стабильной макромолекулярной структуры. Молекулярная структура синтезированных образцов исследована методом инфракрасной спектроскопии с сопоставлением спектров исходного, отходного и переработанного полиуретана. Установлено наличие характерных полос поглощения, соответствующих уретановым группам (–NH–CO–O–), амидным группам N–H (3300–3350 см⁻¹), карбонильным группам C=O (1700–1730 см⁻¹), а также валентным колебаниям эфирных связей C–O–C (1050–1150 см⁻¹). Подтверждено присутствие свободных изоцианатных групп, при этом снижение интенсивности полосы поглощения в области 2270 см⁻¹ свидетельствует о высокой степени взаимодействия групп –NCO с гидроксильными группами полиола в процессе поликонденсации. Спектральный анализ показал, что увеличение содержания изоцианатного компонента сопровождается ростом плотности водородных связей и доли жёстких сегментов, что способствует повышению степени упорядоченности макромолекулярной сетки. С использованием методов молекулярного моделирования в программном комплексе UCSF ChimeraX исследованы пространственная организация функциональных групп, реакционная способность компонентов, кинетика роста макромолекулярных цепей, а также пространственный механизм формирования уретановых связей в образцах исходного, отходного и переработанного полиуретана. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными ИК-спектроскопии и показали, что увеличение содержания метилендифенилдиизоцианата способствует образованию большего числа активных реакционных центров, тогда как использование 1,4-бутандиола в качестве удлинителя цепи обеспечивает стабилизацию пространственной конфигурации макромолекул и усиление межсегментных взаимодействий, что приводит к улучшению структурной организации полиуретановой матрицы.*

Ключевые слова: *спектральный анализ, функциональные группы, валентные колебания, изоцианат, олигомер, этиленгликолевый эфир адипиновой кислоты, полиуретан, диизоцианат, область поглощения, 1,4-бутандиол, структура.*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ISOCYANATE-CONTAINING URETHANE OLIGOMER CONCENTRATIONS ON THE POLYCONDENSATION MECHANISM

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Juraev, R.K. Shokirov

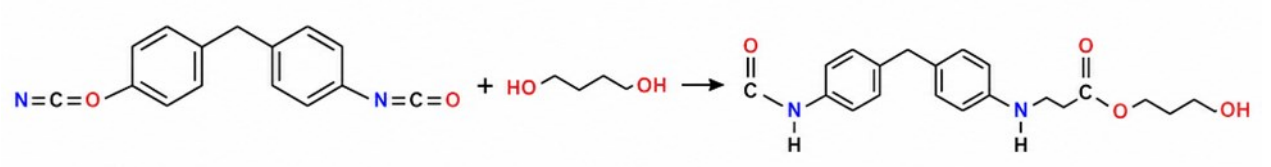
Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *In this work, the influence of the isocyanate component and polyol ratio on the synthesis, macromolecular structure, and physicochemical properties of isocyanate-containing urethane oligomers was investigated. The oligomers were synthesized by stepwise polycondensation using 65, 67, 69, and 71 parts by weight of methylene diphenyl diisocyanate (90 °C), 30, 28, 26, and 24 parts by weight of ethylene glycol ester of adipic acid (75 °C), respectively, and 5 parts by weight of 1,4-butanediol (55 °C), used as a chain extender for all the studied samples. The polycondensation process was carried out for 40 min at a stirring speed of 3600 rpm, which ensured effective degassing of the reaction mixture, removal of dissolved gases, moisture, and air inclusions, and the production of highly homogeneous oligomeric composites. The resulting oligomeric mixtures were poured into molds of the required configuration through a dedicated production line at a reduced pressure of 1.8–2.5 Pa. The samples were cured in the molds at a temperature of 105–115 °C for 22–24 hours, after which the semi-finished products were subjected to additional heat treatment at 80–90 °C for 72–96 hours to complete the crystallization processes and form a stable macromolecular structure. The molecular structure of the synthesized samples was studied using infrared spectroscopy, with the spectra of the original, waste, and recycled polyurethane being compared. The presence of characteristic absorption bands corresponding to urethane groups (–NH–CO–O–), amide groups N–H (3300–3350 cm^{-1}), carbonyl groups C=O (1700–1730 cm^{-1}), as well as stretching vibrations of ether bonds C–O–C (1050–1150 cm^{-1}) was established. The presence of free isocyanate groups was confirmed, while a decrease in the intensity of the absorption band in the region of 2270 cm^{-1} indicates a high degree of interaction of –NCO groups with the hydroxyl groups of the polyol during the polycondensation process. Spectral analysis showed that an increase in the content of the isocyanate component is accompanied by an increase in the density of hydrogen bonds and the proportion of rigid segments, which contributes to an increase in the degree of ordering of the macromolecular network. Using molecular modeling methods in the UCSF ChimeraX software suite, we investigated the spatial organization of functional groups, component reactivity, macromolecular chain growth kinetics, and the spatial mechanism of urethane bond formation in virgin, waste, and recycled polyurethane samples. The modeling results were compared with experimental IR spectroscopy data and showed that increasing the methylene diphenyl diisocyanate content promotes the formation of a greater number of active reaction sites, while the use of 1,4-butanediol as a chain extender stabilizes the spatial configuration of macromolecules and enhances intersegment interactions, leading to improved structural organization of the polyurethane matrix*

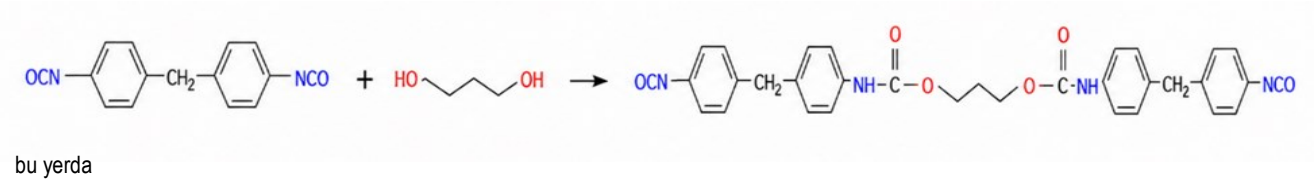
Key words: *spectral analysis, functional groups, stretching vibrations, isocyanate, oligomer, ethylene glycol ester of adipic acid, polyurethane, diisocyanate, absorption region, 1,4-butanediol, structure.*

Kirish

So'nggi yillarda yuqori ekspluatatsion xossalar yuqori bo‘lgan poliuretan materiallariga bo'lgan talabning ortishi izosiyanat funksional guruhli uretan oligomerlari sintezi va ularning makromolekulyar tuzilishini o‘rganishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlarning rivojlanishiga asos bo‘lmoqda. Bugungi kunda sanoatda (4,4'-metilendifenildiizosiyanat $C_{15}H_{10}N_2O_2$, toluol-2,4-/2,6-diizosiyanat $C_9H_6N_2O_2$, geksametilendiizosiyanat $C_8H_{12}N_2O_2$, izoforon diizosiyanat $C_{12}H_{18}N_2O_2$, 4,4'-ditsiklogeksilmetandiizosiyanat $C_{15}H_{22}N_2O_2$, 2,2,4-trimetilgeksametilen diizosiyanat $C_9H_{16}N_2O_2$, 4,4'-dibenzildiizosiyanat $C_{15}H_{12}N_2O_2$) kabi diizosiyanat saqlovchi turlari keng miqyosida qo’llanilmoqda. Ushbu poliuretanlarning tarkibidagi aromatik, alifatik va sikloalifatik guruhlarining mavjudligi, ularning qattiqligi, elastikligi, termik barqarorligi, Uo v-nurlanishga chidamliligi va kimyoviy barqarorligini taminlaydi[1-3]. Izosiyanat funksional guruhli poliuretanlar, termik barqarorligi hamda yuqori mexanik ko'rsatkichlari sababli, himoya qoplama materiallar, konstruksion kompozitlar va yedrilishga chidamli sanoat buyumlari ishlab chiqarishda keng qo'llanilmoqda. Ularning optimal fizik-mexanik xossalarga ega bo’lishi izosiyanat va poliol komponentlarining kimyoviy tabiati, NCO/OH molyar nisbati, zanjir uzaytiruvchi reagentlar (COO), segmentli makromolekulyar tuzilish hamda polikondensatsiyalanish kinetikasi bilan uzviy bog'liqdir. Izosiyanat guruhlari (–NCO) ning gidroksil (–OH) guruhlari o’zaro reaksiyasi natijasida hosil bo'ladigan uretan bog'lari (–NH–CO–O–) makromolekulyar zanjirning shakllanishi va fazaviy ajralish darajasini belgilaydi. Ushbu reaksiyalar poliuretan sintezining asosiy ketma-ketlik bosqichlari hisoblanib 1-bosqichda MDI gidroksil guruhi bilan reaksiya krishib quyidagi kimyoviy formulani hosil qiladi[4].

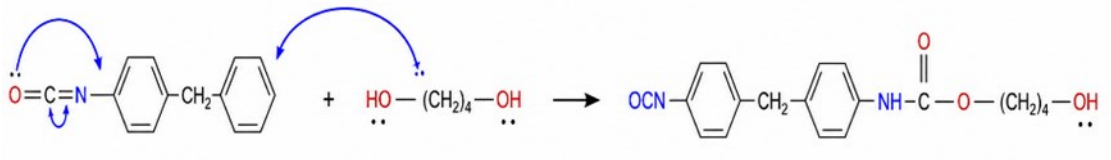


2-bosqichda izosiyanat funksional guruhli polimer hosil bo'lish reaksiyasi

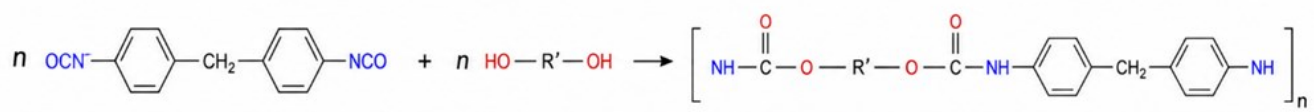


bu yerda
R" teng HO–CH2–CH2–O–C(O)–(CH2)4–C(O)–O–CH2–CH2–OH

3-bosqich zanjir uzaytirish bunda quyidagicha reaksiya boradi reaksiya mexanizmi (nukleofil)[5]



4--bosqich poliuretan makromolekulasining polikondensatsiyalanish reaksiyasi



Polikondensatsiyalanish reaksiya davomida harorat, komponentlar nisbatining optimalligi va aralashtirish gidrodinamikasi polimerlanish tezligi, qovushqoqlikning o‘zgarishi hamda zanjir o‘sish kinetikasiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Oligamerlar asosida poliuretan sintez qilish jarayonida aralashma tarkibida qoluvchi havo, namlik va uchuvchan komponentlar keyingi polimerlanish bosqichida g‘ovaklik, mikro-bo‘shliqlar va ichki nuqsonlarning hosil bo‘lishiga olib keladi. Natijada materialning mexanik mustahkamligi, adgeziyasi, termik barqarorligi ushbu materiallardan tayyorlangan sanoat namunalari butlovchi qismlarning ishlash muddatlariga salbiy ta’sir ko‘rsatadi[6,7]. Shu bois xalqaro ilmiy tadqiqotlarda vakuumli gazsizlantirish, gaz pufakchalarini olib tashlash, tutilgan gazni ajratib olish va eritmalarni gomogenizatsiya qilish texnologiyalari poliuretan eritmalarini tayyorlashning ajralmas bosqichi sifatida qaralmoqda.

Tadqiqotning maqsadi: Izosiyanat funksional guruhli uretan oligo-merlarining sintez mexanizmi, polikondensatsiyalanish kinetikasini hamda NCO/OH molyar nisbatining makromolekulyar tuzilishini polikon-densatsiyalanishga ta’sirini tadqiq etish, hosil bo‘lgan oligomerlarning strukturaviy xususiyatlarini IQ-spektroskopiyasi va UCSF ChimeraX molekulyar modellashtirish usullari yordamida tavsiflash, funksional guruhlari miqdorining reaksion faollik, zanjir o‘sish kinetikasi va strukturaviy-funksional xossalari o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlash hamda yuqori reaktivlikka ega izosiyanatli polimerlar sintezining optimal texnologik parametrlarini ishlab chiqishdan iborat. [8].

Tadqiqot ob’ekti va usullari

4,4'-metilendifenildiizosiyanat, adipin kislotasining etilenglikol efiri va butandiol-1,4dan tashkil topgan funksional guruhli uretan oligomerlarin-ing sintez mexanizmini o‘rganish bo‘lib erkin –NCO guruhlari miqdori va makromolekulyar tuzilish shakllanishiga ta’siri, hamda olingan uretan oligomerlarining IQ-spektroskopiya yordamida strukturaviy tavsiflanishi UCSF ChimeraX dasturi yordamida sintez mexanizmi va reaksion qobilyatini zamonaviy yondashuvlar asosida tahlil qilish hisoblanadi[8].

Olingan natijalar va ularning tahlili

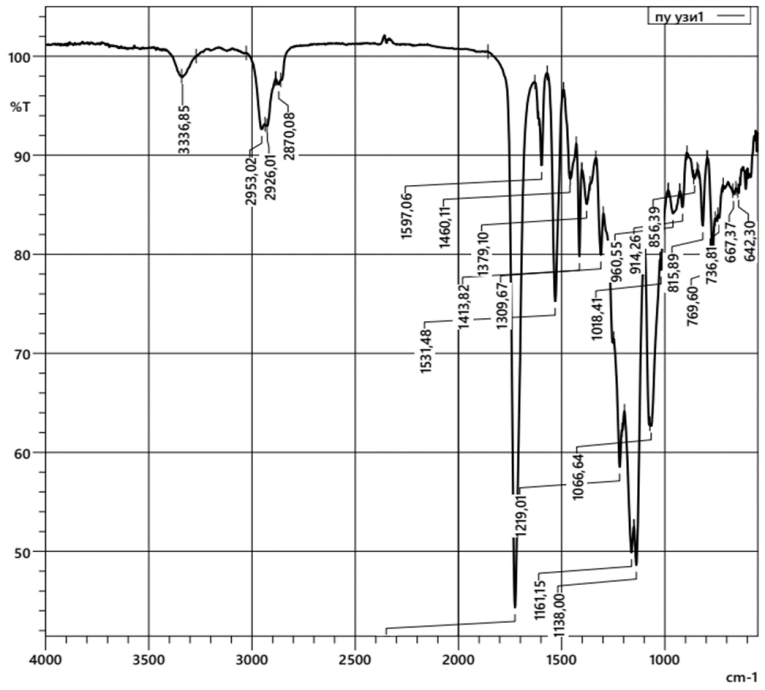
Ushbu ilmiy tadqiqot ishida toza (PU-1), chiqindi (PU-2) va qayta ishlangan (PU-3) poliuretan namunalarining IQ spektrlari hamda UCSF ChimeraX dasturi yordamida olingan molekulyar tuzilishlari tadqiq qilin-ib sintez jarayonida komponentlar massaviy nisbati mos ravishda 65,67,69,71:30,28,26,24 etib tanlandi va NCO/OH molyar nisbati opti-mal miqdori aniqlandi. Ushbu nisbat ortiqcha izosiyanat funksional guruhlarini mavjudligini uretan polimerlarini hosil qilish imkonini berib polimer tarkibida yetarli miqdordagi erkin –NCO guruhlarini saqlash va keyingi zanjir uzayish reaksiyalarining samaradorligini oshirish uchun xizmat qiladi. Reaksiya 90°C haroratda 40 minut davomida va 3600 ayl/min aralashtirish tezligida olib borildi bunday texnologik parametrlar komponentlarning gomogen aralashishini ta’minlab, izosiyanat va gidroksil guruhlari o‘rtasidagi polikondensatlanish kinetikasini jadallashtiradi. Poliuretan tarkibida aniqlangan 17,8±0,3 % erkin –NCO guruhlari sintez natijasida izosiyanat funksionalligi muvaffaqiyatli saqlanganligini ko‘rsatadi. Bu qiymat izosiyanat asosli polimerlar uchun adabiyotlarda tavsiya etilgan qiymat bilan mos keladi va keyingi bos-qichlarda zanjir uzaytiruvchi yoki polifunksional reagentlar bilan reaksiyaga kirishish uchun yetarli reaksion markazlar mavjudligi aniqlandi[9].

1-jadval

Polikondensatsiyalanish jarayonida reagentlar tarkibi

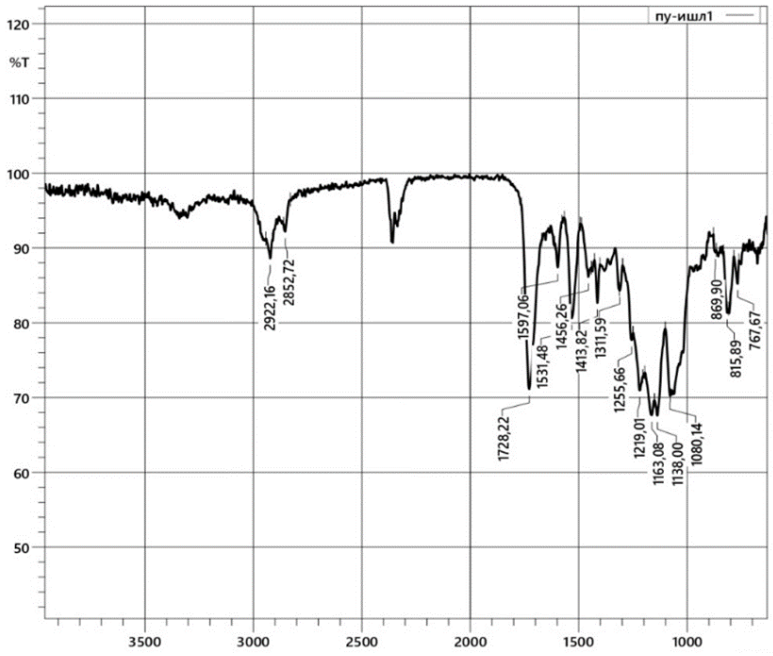
№	Namuna	4,4'-MDI massa qism	Poliefir (adipin kislotasining etilenglikol efiri), massa qism	BDO (1,4-butandiol), massa qism
1	PU-1	65	30	5
2	PU-2	67	28	
3	PU-3	69	26	
4	PU-4	71	24	

PU-1,2,3,4 lar turli miqdorli poliuretan namunalari.



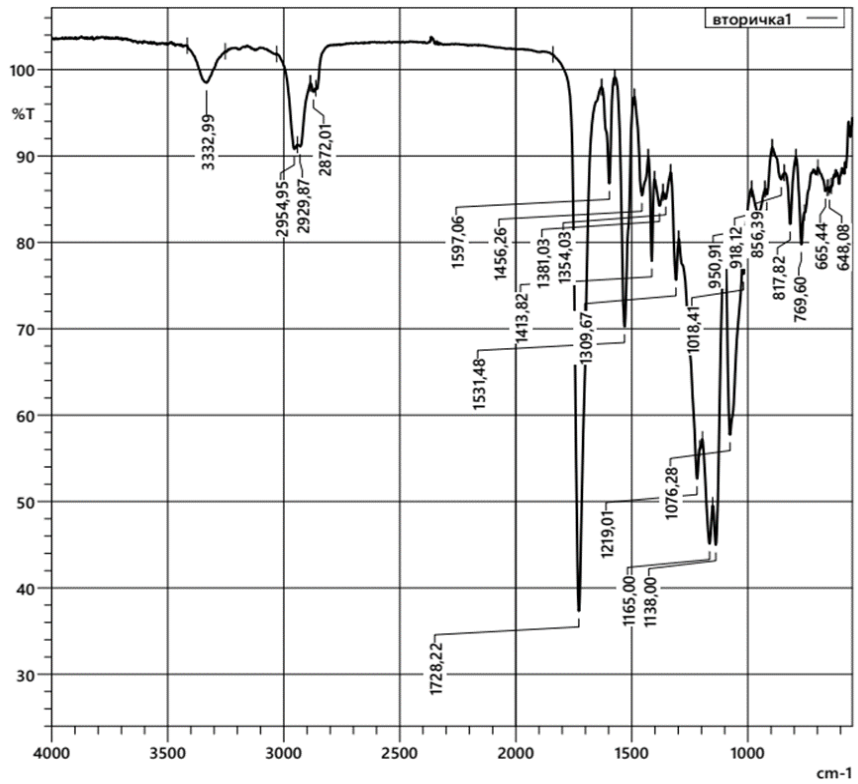
1-rasm. Toza poliuretan namunasining IQ-spektri

Ushbu rasmda toza poliuretan namunasining IQ spektri 3336 cm^{-1} da kuzatilgan yutilish cho'qqisi uretan guruhiga xos N–H valent tebranishlarini, 2953 va 2878 cm^{-1} diapazonidagi cho'qqilar esa alifatik $–CH_2$ – va $–CH_3$ guruhlarining assimetrik hamda simmetrik valent tebranishlarini ifodalaydi. 1729 cm^{-1} dagi intensiv yutilish uretan bog'laridagi karbonil (C=O) guruhining valent tebranishiga, 1597–1531 cm^{-1} oralig'idagi cho'qqilar aromatik halqa (C=C) va N–H deformatsion tebranishlariga mos keladi. 1219–1066 cm^{-1} diapazonida kuzatilgan intensiv yutilishlar uretan va poliol segmentlariga tegishli C–O–C hamda C–N bog'larining valent tebranishlarini ifodalab spektrdagi ushbu yutilish chiziqlari MDI asosidagi poliuretan makromolekulyar tuzilishida –NH–CO–O– uretan bog'lari muvaffaqiyatli shakllanganligini va polimer zanjirining kimyoviy yaxlitligi saqlanganligini ko'rsatadi[10].



2-rasm. Chiqindi poliuretan namunasining IQ-spektri

Chiqindi poliuretan namunasining IQ spektrida kuzatilgan yutilish cho'qqilari alifatik $–CH_2–$ guruhlarining assimetrik va simmetrik valent tebranishlariga mos keladi 1456–1315 cm^{-1} diapazonidagi yutilishlar esa $–CH_2–$ deformatsion hamda C–N bog'larining tebranishlariga mos kelishi valent tebranishlari bilan tavsiflandi, 870–768 cm^{-1} diapazonidagi cho'qqilar esa MDI tarkibidagi aromatik halqaning tekislikdan tashqari deformatsion tebranishlariga tegishlidir. Toza poliuretan namunasi bilan taqqoslaganda asosiy funksional guruhlarga tegishli yutilish cho'qqilarining saqlanib qolishi chiqindi poliuretan tarkibida makromolekulyar arxitekturaning asosiy qismi saqlanganligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, karbonil va efir guruhlari intensivligidagi nisbiy o'zgarishlar qayta ishlash va ekspluatatsiya jarayonida uretan bog'larining qisman termooksidlanish destruksiyaga uchrashi hamda segmentlararo vodorod bog'lanishlarining qayta tashkil topishi bilan izohlanadi[11].



3-rasm. Qayta ishlangan poliuretan namunasining IQ-spektri

Qayta ishlangan poliuretan namunasining IQ spektri 3329 cm^{-1} da kuzatilgan keng yutilish cho'qqisi uretan guruhiga xos N–H valent tebranishlarini ifodalab, qayta ishlash jarayonidan so'ng ham vodorod bog'lanishlari bilan bog'liq makromolekulyar guruhlarni saqlab qolganligini ko'rsatadi. poliuretan zanjiridagi –NH–CO–O– bog'larining asosiy qismi qayta ishlash jarayonida saqlanganligini tasdiqlaydi 1597, 1531 va 1456 cm^{-1} oralig'idagi cho'qqilar MDI aromatik halqasining C=C valent tebranishlari hamda N–H deformatsion tebranishlariga mos kelishi 1219–1018 cm^{-1} diapazonida kuzatilgan intensiv yutilishlar uretan va poliol segmentlariga xos C–O–C hamda C–N bog'larining valent tebranishlarini ifodalaydi[12]. Toza va chiqindi poliuretan namunalari tarkibidagi asosiy funksional guruhlarga tegishli yutilish chiziqlarining saqlanib qolganligini, biroq ayrim cho'qqilar intensive o'zgarishlari qayta ishlash jarayonida vodorod bog'lanishlarining qayta tashkil topishi, segmentlararo o'zaro ta'sirlarning kuchayishi hamda uretan bog'larining qisman termooksidlanish va qayta tikilish jarayonlari sodir bo'lganligini ko'rsatadi.

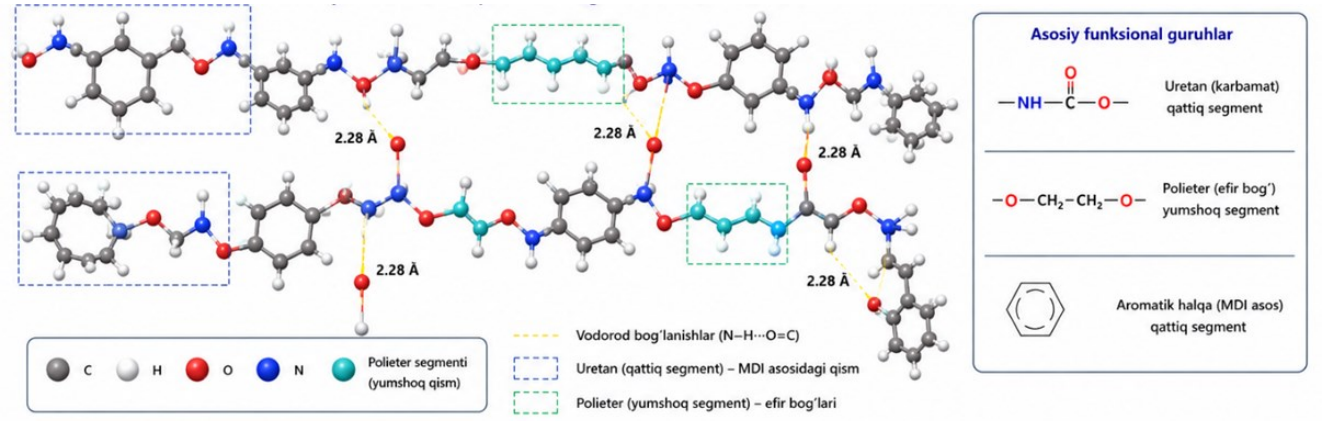
2-jadval

Poliuretan namunalarining IQ-spektroskopik tahlil natijalari

№	Namunalar	Funksional guruh / Yutilish sohasi, sm^{-1}									
		C-O	C-N	NH_2	RC(O)NH	C=O	CH_2	C-H	CH_3	C-O	NH
1	PU-1	1058	1430	1650-1580	1651	1731	2292,16	2950-2850	2852	2953-2870	3300-3440
2	PU-2	1058	1430	1650-1580	1530	1730	2922	2950-2850	2852	2953-2870	3300-3440
3	PU-3	1058	1430	1650-1580	1274	1728	2922,16	2950-2850	2850	2953-2870	3300-3440

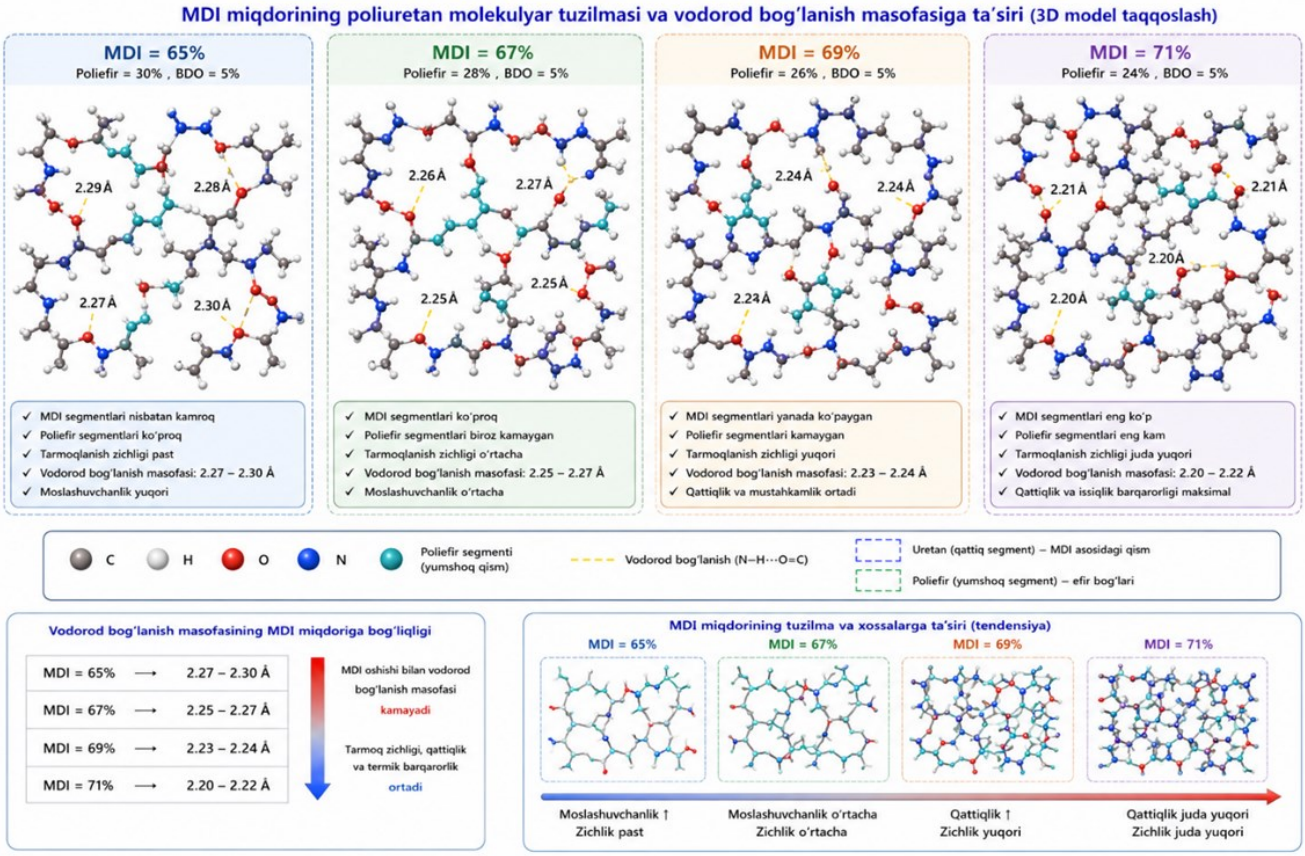
Izoh: bu yerda. PU-1 toza, PU-chiqindi, PU-3 qayta ishlangan poliuretan namunalari.

Toza, chiqindi va qayta ishlangan poliuretan namunalarining infraqizil spektrlarini qiyosiy o‘rganish ularning kimyoviy tuzilishida qanday o‘zgarishlar sodir bo‘lganligini aniqlash imkonini berdi. Ushbu namunalarning spektrlarida poliuretanga xos asosiy yutilish kuzatildi, bu esa (uretan) guruhining saqlanib qolganligidan dalolat beradi. Tadqiqotning muhim jihat shundaki, IQ-spektrlar natijalari qayta ishlangan poliuretanning asosiy funksional guruhlari uretan bog‘i, aromatik halqa va poliefir segmentlari saqlanib qolganligini, faqat vodorod bog‘lanishi va aromatik halqalarning fazoviy joylashuvi darajasida qisman o‘zgarishlar yuz berganligini ko‘rishimiz mumkin.



4-rasm: MDI asosli toza poliuretan namunasining uch o'lchamli molekulyar fazoviy modeli

Rasmda 4,4'-metilendifenildiizosiyanat asosida sintez qilingan toza poliuretan makromolekula sining uch o‘lchamli fazoviy konfiguratsiyasi tasvirlangan bo‘lib molekulyar model tarkibida uretan (–NH–CO–O–) bog‘lari orqali birikkan aromatik MDI qattiq segmentlari va poliefer (–O–CH_2–CH_2–O–) yumshoq segmentlari navbatma-navbat joylashganligini ko’rishimiz mumkin. Uretan guruhlari o‘rtasida hosil bo‘ladigan ichkimolekulyar vodorod bog‘lari (N–H···O=C) qattiq segmentlarning o‘zaro birikib yiriklashishini ta’minlab, molekulyar tarmoqning yuqori darajada tartiblanishiga xizmat qiladi. Adabiyotlarga ko‘ra ushbu vodorod bog‘larining tipik uzunligi 2.0–2.3 Å oralig‘ida bo‘lib, rasmda kuzatila-



5-rasm: MDI miqdroning poliuretan molekulyar tuzilishiga va vodorod bog’lanishga tasiri

yotgan 2.28 Å qiymati MDI asosidagi poliuretanlar uchun xos bo‘lgan kuchli vodorod bog‘lanishlariga to‘liq mos kelishi aniqlandi. MDI tarkibli aromatik fenil halqalari qattiq segmentning asosiy strukturaviy elementi bo‘lib, ularning yuqori qutblanishi makromolekula zanjirlarining qisman kristallanishiga va segmentlararo fazaviy ajralishga olib keldi. Xalqaro tadqiqotlarda MDI asosidagi poliuretanlarda qattiq segment ulushi odatda 25–45 % oralig‘ida bo‘lganda vodorod bog‘lanishlari ulushi 70–90 % gacha yetishi, bu esa Young moduli, uzulishdagi mustahkamligi va termik barqarorlikning sezilarli ortishiga sabab bo‘lishi aniqlangan. Molekulyar modelda ko‘rsatilgan fazoviy konfiguratsiya poliuretan makromolekulalarining egiluvchan poliefer segmentlari va qattiq uretan segmentlari o‘rtasidagi muvozanatni yaqqol namoyon qiladi[13]. Qattiq segmentlarda aromatik halqalar orasidagi π–π o‘zaro ta'sirlar hamda vodorod bog‘larining birgalikdagi mavjudligi makromolekulaning yuqori mexanik mustahkamligi, 180–220 °C gacha bo‘lgan dastlabki termik barqarorligini hamda yedrilishga chidamliligini ta'minlaydi.

Ushbu rasmda MDI (4,4'-metilendifenildiizosiyanat) miqdorining 65, 67, 69 va 71% gacha ortishi natijasida poliuretan makromolekulasining fazoviy konfiguratsiyasi, segmentlararo o'zaro ta'sirlar hamda vodorod bog'lanishlarining uch o'lchamli modeli tasvirlangan. MDI konsentratsiyasining ortishi bilan qattiq segmentlar (–NH–CO–O– va aromatik fenil halqalari) ulushi oshib borishi natijasida molekulyar tarmoq zichlashadi va ichkimolekulyar vodorod bog'lanishlarining soni hamda energiyasi sezilarli ravishda ortadi. 65% MDI tarkibli namunada poliefer yumshoq segmentlari nisbatan ko'p bo'lganligi sababli makromolekulalar orasidagi harakatchanlik yuqori saqlanadi. Ushbu holatda vodorod bog'lanishlari asosan 2.27–2.30 Å oralig'ida shakllanib, segmentlararo o'zaro ta'sirlar nisbatan zaif bo'ladi. Bunday molekulyar konfiguratsiya elastiklik xossalari yuqori bo'lishini ta'minlasa-da, qattiqlik va termik barqarorlik nisbatan past bo'ladi. MDI miqdori 67% ga oshirilganda qattiq segmentlar ulushi ortishi hisobiga vodorod bog'lanish masofasi 2.25–2.27 Å gacha qisqaradi. Natijada uretan guruhlari o'rtasidagi dipol-dipol hamda N–H···O=C vodorod bog'lari kuchayadi, mikrofazalararo ajralishi yanada aniqroq namoyon bo'ladi va makromolekulyar zanjirlarning erkin aylanish darajasi kamayadi. MDI miqdori 69% ga yetganda molekulyar tarmoqning zichligi sezilarli oshadi. Vodorod bog'lanish masofasi 2.23–2.24 Å gacha qisqarishi uretan guruhlari o'rtasidagi assotsiatsiya darajasining ortganligini hamda qattiq segmentlar miqdorining Young moduli, uzulishdagi mustahkamlik va termik deformatsiyaga chidamlilikni ortishini ko‘rishimiz mumkin[14]. 71% MDI tarkibli namunada aromatik qattiq segmentlar maksimal darajada bo'lib, vodorod bog'lanishlari 2.20–2.22 Å gacha qisqarishi xalqaro tadqiqotlarda aynan ushbu masofa kuchli ichkimolekulyar vodorod bog'lanishlari uchun xos ekanligi ko'rsatilgan. Bog'lanish masofasining qisqarishi bog'lanish energiyasining ortishiga olib keladi va makromolekulalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirlarni kuchaytiradi. Natijada supmolekulyar tarmoq yanada zichlashadi, qattiq segmentlarni uzluksiz hosil qiladi hamda materialning qattiqligi, termik barqarorligi va yedrilishga chidamliligi maksimal qiymatlarga yaqinlashadi[15]. Shunday qilib, uch o'lchamli molekulyar model MDI miqdorining oshishi poliuretan makromolekulalarida qattiq segmentlarning ulushi va vodorod bog'lanishlarining intensivligini oshirishini, bog'lanish masofasining 2.27–2.30 Å dan 2.20–2.22 Å gacha qisqarishini hamda natijada yuqori zichlikka ega, mexanik va termik jihatdan barqaror supramolekulyar struktura shakllanishini yaqqol namoyish etadi. Mazkur qonuniyat MDI asosidagi poliuretan makromolekulasining strukturaviy-mexanik xossalarini boshqarishda asosiy molekulyar omillardan biri hisoblanadi.

Xulosa

Olib borilgan ilmiy tadqiqot natijalari asosida IQ spektroskopik tahlil va uch o‘lchamli 3D molekulyar modellashtirish natijalari asosida toza, chiqindi va qayta ishlangan poliuretan namunalarining kimyoviy tuzilishi hamda makromolekulyar strukturasi qiyosiy tahlil qilindi. Barcha spektrlarda 3330–3340 cm^{-1} diapazonidagi N–H valent tebranishlari, 2920–2955 cm^{-1} va 2850–2878 cm^{-1} dagi alifatik C–H guruhlari, 1728–1730 cm^{-1} dagi uretan karbonil (C=O) guruhi, 1597–1531 cm^{-1} oralig‘idagi aromatik C=C va Amid II tebranishlari hamda 1219–1060 cm^{-1} diapazonidagi C–O–C va C–N bog‘lariga xos yutilish chiziqlarining saqlanib qolishi poliuretan makromolekulasi skeletining qayta ishlash jarayonida deyarli o‘zgarmaganligini tasdiqlaydi. Bu natijalar uretan bog‘lari (–NH–CO–O–) ning asosiy qismi termokimyoviy ishlovdan keyin ham barqaror saqlanib qolganligini ko‘rsatadi. PU-2 va PU-3 namunalarida ayrim yutilish cho‘qqilarining intensivligi hamda shaklidagi kichik o‘zgarishlar uretan segmentlari o‘rtasidagi ichkimolekulyar vodorod bog‘lanishlarining qayta tashkil topishi, segmentlararo o‘zaro ta'sirlarning kuchayishi va makromolekulyar zanjirlarning qisman qayta orientatsiyalanishi bilan izohlanadi. Biroq spektrlarda yangi funksional guruhlarga xos qo‘shimcha yutilish chiziqlarining kuzatilmasligi qayta ishlash jarayonida polimerning asosiy kimyoviy tuzilishi saqlanib qolganligini va destruksiya jarayoni cheklangan darajada sodir bo‘lganligini ko‘rsatadi. 3D molekulyar model tahlili MDI asosidagi aromatik qattiq segmentlar, adipat poliol asosidagi yumshoq segmentlar va 1,4-butandiol orqali hosil qilingan zanjir uzaytiruvchi fragmentlarning fazoviy joylashuvini yaqqol namoyon etdi. Modelda uretan bog‘lari atrofida shakllanuvchi N–H···O=C tipidagi vodorod bog‘lanishlari (taxminan 2,48 Å) segmentlararo kuchlarni oshiruvchi supramolekulyar omil sifatida xizmat qilishi aniqlandi. IQ-spektr va 3D molekulyar modellashtirish natijalarining o‘zaro mosligi MDI+poliefer+BDO tizimida sintez qilingan poliuretanlarda makromolekulyar strukturasida qayta ishlashdan keyin ham saqlanib qolishi, uretan bog‘lari va aromatik segmentlarning strukturaviy yaxlitligi aniqlandi.

Bibliografik ro'yxati:

1. Asranova U. X. Tabiiy va sintetik kauchuk olishning va ayrim xossalarini tahlil qilish //AndMI Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyalari. – 2024. – T. 1. – №. 1. – C. 456-463.

2. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix //Chemical Methodologies. – 2025. – T. 9. – №. 6. – C. 448-460.

3. Bridges L. R. RNA as a component of scrapie fibrils //Scientific Reports. – 2024. – T. 14. – №. 1. – C. 5011.

4. van Genabeek B. et al. Properties and applications of precision oligomer materials; where organic and polymer chemistry join forces // Journal of Polymer Science. – 2021. – T. 59. – №. 5. – C. 373-403.

5. Shodiyev A., Mukhiddinov B., Kiyomov S. Effect of change of polyethropoliol amount on the physical-mechanical properties of thermoreactive polyurethane // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2022. 10(103). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14396 (дата обращения: 28.11.2022).

6. Kapund J. Molecular Dynamics Simulations of 53BP1 Structural Mechanisms in DNA Double-Strand Break Repair and Implications for Therapeutic Development //Youth Science Journal. – 2024. – T. 5. – №. 10. – C. 6-6.

7. Çınar M. UV Işığıyla Sertleşebilen Fonksiyonel Polimer-Nanokompozit Malzemelerin Geliştirilmesi : дис. – Marmara Universitesi (Turkey), 2024.

8. Стрельников В. Н. и др. Термическое старение полиуретановых эластоме-ров и расчетная оценка срока их службы при повышенных температурах //Ползуновский вестник. – 2025. – №. 3. – С. 163-169.

9. Attar R. M. S., Imam M. A. Molecular Insights into Phage–Hydrogel Polymer Interactions Through Docking, Molecular Dynamics, and Machine Learning //Polymers. – 2026. – Т. 18. – №. 8. – С. 906.
10. Tehrani D. et al. Structural basis of chondroitin sulfate backbone polymer synthesis //Nature Communications. – 2026.
11. Глоба А. И. и др. Синтез водных дисперсий функционализированных стирол-акриловых сополимеров и получение гибридных полиуретан-акриловых покрытий на их основе. – 2025.
12. Slobodinyuk A. et al. Preparation, structure and properties of urethane-containing elastomers based on epoxy terminal oligomers // Polymers. – 2022. – Т. 14. – №. 3. – С. 524.
13. Zhang Q. et al. Recent structural engineering of polymer semiconductors incorporating hydrogen bonds //Advanced Materials. – 2022. – Т. 34. – №. 26. – С. 2110639.
14. Wan Q., Thompson B. C. Control of properties through hydrogen bonding interactions in conjugated polymers //Advanced science. – 2024. – Т. 11. – №. 8. – С. 2305356.



Мухиддинов Баходир Фахриддинович – профессор кафедры «Химическая технология», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор химических наук, профессор
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-2411-2914

Bakhodir Fakhriddinovich Mukhiddinov – Professor of Department “Chemical technology”, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Chemistry Science, Professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-2411-2914

Muxiddinov Baxodir Faxriddinovich – “Kimyoviy texnologiya” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, kimyo fanlari doktori, Professor
E-mail:
ORCID: 0009-0006-2411-2914



Шодиев Аслиддин Фахриддин угли – заместитель декана Факультета агроинженерии и коммуникационных технологий, Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-7776-1950

Asliddin Fakhriddin ugli Shodiev – Deputy Dean of the Faculty of Agroengineering and Communication Technologies, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-7776-1950

Shodiyev Asliddin Faxriddin o‘g‘li – Agromuhandislik xa kommunikatsion texnologiyalar fakulteti dekan o‘rinbosari, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, PhD
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-7776-1950



Джураев Шохрух Тулкинович – декан Факультета агроинженерии и коммуникационных технологий, Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994

Shohrukh Tulqinovich Jurayev – Dean of the Faculty of Agroengineering and Communication Technologies, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Science, Professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994

Jo‘rayev Shohrux To‘lqinovich – Agromuhandislik xa kommunikatsion texnologiyalar fakulteti dekani,Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994



Шокиров Равшан Кахрамонович – докторант кафедры «Агрономия», Навоийский государственный горно-технологический университет
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0008-8218-7599

Ravshan Kahramonovich Shokirov – PhD Student of the Department of Agronomy, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0008-8218-7599

Shokirov Ravshan Qahramonovich – “Agronomiya” kafedrasi tayanch doktoranti, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0008-8218-7599

UO'K 67.08:347.218.1 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.11

STABILIZATOR KONSENTRATSIYASINING QAYTA ISHLANGAN POLIURETAN MATERIALINING TERMIK BARQARORLIGIGA TA'SIRI

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Jo'raev, D.T. Isayev

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O'zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Ushbu maqolada 4,4-metilendifenildiizosiyanat asosli poliuretan chiqindilarini termokimyoviy qayta ishlash jarayonida qo'llaniladigan stabilizatorlarning termik barqarorlik va fizik-mexanik xossalarga ta'siri o'rganildi. Hosil bo'lgan poliuretan chiqindilari maxsus maydalagich yordamida birlamchi 100*120mmli o'chamlargacha maydalaniladi so'ngra maydalangan chiqndi bo'laklari 110–120°C harorat tasirida suyuqlantirildi va suyuqlantrish jarayonida suyuqlanma massasini doimiy ravishda aralashtrib turlidi, hosil bo'lgan gomogen massaning umumiy miqdoriga nisbatan bog'lovchi sifatida 20 % 4,4'-metilendifenildiizosiyanat qo'shildi, reaksiya aralashmasi 1600 ayl/min tezlikda 2–3 daqiqa davomida aralashtirilib, gomogen holatga keltirilib so'ngra fosfat kislotasining tributil efiri ($(C_4H_9O)_3PO$) hamda rux stearati ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) alohida stabilizatorlar sifatida 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 va 1,0 % konsentratsiyalarda kiritilib stabilizatorlarlarning zarrachalari suyuqlanma ichiga to'liq aralashguncha, 1–2 daqiqa davomida 1600 ayl/min tezlikda aralashtirildi va tayyor aralashma kerakli sanoat qoliplariga quyildi. Hamda olingan namular 110-115oC harorat ostida 70-72soat davomida ushlanadi bunga sabab chiqindi suyuqlanmasi, 4,4-metilendifenildiizosiyanat va stabilizatorlarning o'rtasidagi funksional guruhlar to'liq kristallanishi uchun maxsus pechda ishlov beriladi. Tadqiqotda stabilizatorlarni qo'llanilishi qayta ishlangan poliuretan kompozitsiyasining mikroskopik kuzatuvlari, qattiqlik darajalari o'zgarishi, termooksidlanish barqarorligini ortishi, termodestruksiya tezligini kamayishi hamda makromolekulyar tuzilishga ta'siri o'rganildi hamda tanlangan stabilizatorlarni qo'llash bilan olingan poliuretan namunalarining turli haroratli muhitlarda qo'llash bo'yicha ilmiy xulosalar tayyorlandi.*

Kalit so'zlar: *poliuretan chiqindisi, 4,4'-metilendifenildiizosiyanat, termokimyoviy qayta ishlash, fosfat kislotasining tributil efiri, rux stearati, termik stabilizator, termooksidlanish; polimer modifikatsiyasi, stabilizator, kristallanish, suyuqlanma.*

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СТАБИЛИЗАТОРА НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ПЕРЕРАБОТАННОГО ПОЛИУРЕТАНА

Мухиддинов Б.Ф., Шодиев А. Ф., Жураев Ш.Т., Исаев Д.Т.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной статье исследовано влияние стабилизаторов на термическую стабильность и физико-механические свойства полиуретановых материалов, полученных методом термохимической переработки отходов полиуретанов на основе 4,4'-метилендифенилдиизоцианата. Образующиеся полиуретановые отходы предварительно измельчали в специальной дробильной установке до фрагментов размером 100 × 120 мм, после чего подвергали плавлению при температуре 110–120 °C при непрерывном перемешивании расплава. В качестве связующего в гомогенизированную массу вводили 20 % 4,4'-метилендифенилдиизоцианата, после чего реакционную смесь интенсивно перемешивали при скорости 1600 об/мин в течение 2–3 мин до достижения однородного состояния. Далее в качестве индивидуальных стабилизаторов в систему вводили трибутилфосфат ($(C_4H_9O)_3PO$) и стеарат цинка ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) в концентрациях 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 %. После полного диспергирования стабилизаторов расплав дополнительно перемешивали при 1600 об/мин в течение 1–2 мин, затем полученную композицию заливали в промышленные формы. Полученные образцы подвергали термообработке при температуре 110–115 °C в течение 70–72 ч, что обеспечивало завершение процессов взаимодействия функциональных групп полиуретанового расплава, 4,4'-метилендифенилдиизоцианата и стабилизаторов с формированием пространственно-сшитой макромолекулярной структуры и достижением высокой степени структурной стабилизации материала. В работе проведена комплексная оценка влияния исследуемых стабилизаторов на микроструктуру переработанных полиуретановых композиций, изменение твердости, повышение термоокислительной стабильности, снижение скорости термической деструкции, а также на особенности формирования макромолекулярной структуры. На основании полученных результатов сформулированы научно обоснованные выводы о целесообразности применения выбранных стабилизаторов для повышения эксплуатационных характеристик переработанных полиуретановых материалов, предназначенных для эксплуатации в широком диапазоне температур.*

Ключевые слова: *отходы полиуретана, 4,4'-метилендифенилдиизоцианат, термохимическая переработка, трибутиловый эфир фосфорной кислоты, стеарат цинка, термостабилизатор, термоокисление; модификация полимеров, стабилизатор, кристаллизация, сжижение.*

EFFECT OF STABILIZER CONCENTRATION ON THE THERMAL STABILITY OF RECYCLED POLYURETHANE MATERIAL

B.F. Muhiddinov, A.F. Shodiev, Sh.T. Juraev, D.T. Isaev

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This study investigates the effect of stabilizers on the thermal stability and physicomechanical properties of polyurethane materials obtained through the thermochemical recycling of 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate based polyurethane waste. The polyurethane waste was initially reduced to fragments measuring 100 × 120 mm using a specialized crushing unit and subsequently melted at 110–120 °C under continuous mechanical stirring. Subsequently, 20 % of 4,4'-methylenediphenyldiisocyanate, relative to the total mass of the homogeneous melt, was introduced as a binder. The reaction mixture was homogenized by stirring at 1600 rpm for 2–3 min. Thereafter, tributyl phosphate ($(C_4H_9O)_3PO$) and zinc stearate ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) were separately incorporated as stabilizers at concentrations of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0 wt.%. The resulting compositions were further mixed at 1600 rpm for 1–2 min until complete dispersion of the stabilizer particles, followed by casting into industrial molds. The prepared specimens were thermally cured at 110–115 °C for 70–72 h to ensure the completion of reactions between the functional groups of the polyurethane melt, 4,4'-MDI, and the stabilizers, thereby promoting the formation of a highly crosslinked macromolecular network and improving the structural stability of the material. A comprehensive evaluation was performed to determine the influence of the selected stabilizers on the microstructure, hardness, thermo-oxidative stability, thermal degradation behavior, and macromolecular architecture of the recycled polyurethane composites. The experimental results demonstrated that the incorporation of appropriate stabilizers effectively enhanced the thermal resistance and structural integrity of the recycled polyurethane materials while reducing the rate of thermal degradation. Based on the obtained findings, scientifically substantiated conclusions were drawn regarding the applicability of the selected stabilizers for improving the performance characteristics of recycled polyurethane materials intended for service under a wide range of operating temperatures.*

Key words: *recycled polyurethane, 4,4'-methylenediphenyldiisocyanate, thermochemical processing, tributyl phosphorate, zinc stearate, thermal stabilizer, thermal oxidation; polymer modification, stabilizer, crystallization.*

Kirish

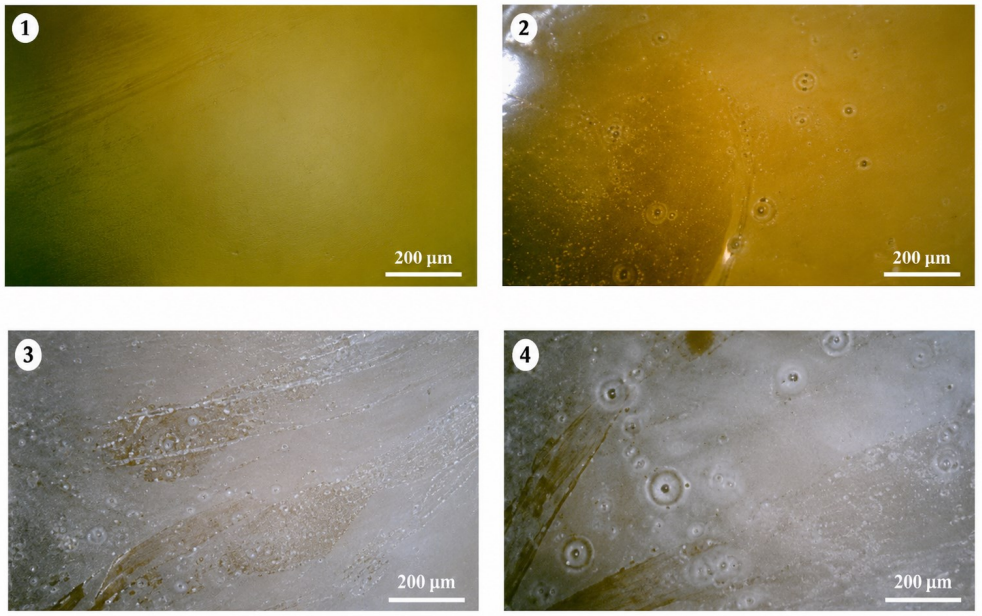
Poliuretanlar polimer materiallar orasida eng jadal rivojlanayotgan sinflardan biri bo‘lib, yuqori elastiklik, mexanik mustahkamlik, yedrilishga chidamlilik, kimyoviy barqarorlik hamda keng diapazondagi fizik-mexanik xossalari bilan ajralib turadi, poliuretanlar makromolekulalari asosan poliollar va diizosiyanatlarning polikondensatsiyalanish reaksiyasi natijasida hosil bo‘lib, ularning tarkibidagi yumshoq va qattiq segmentlarning nisbati materialning mexanik, termik va ekspluatatsion xossalarini kengaytirish imkonini beradi. Aynan ushbu molekulyar tuzilish poliuretanlarni qattiq va yumshoq ko‘piklar, qoplamalar, germetiklar hamda kompozitsion materiallar ishlab chiqarishda eng muhim polimerlardan biriga aylantirgan bo‘lib so‘nggi yillarda poliuretanlarga bo‘lgan talab muntazam ortib bormoqda tahlillarga ko‘ra, poliuretanlar dunyo bo‘yicha ishlab chiqarilayotgan barcha plastmassalarning 5–8 % ini tashkil etadi hamda hajm jihatidan dunyodagi oltinchi eng ko‘p ishlab chiqariladigan polimer materiallardan hisoblanadi. 2019-yildagi yillik ishlab chiqarish hajmi 18,6 million tonna bo‘lsa, 2024-yilga kelib poliuretan ishlab chiqarish 22 million tonna atrofida bo‘lgani qayd etilganligi bilan birga poliuretan sanoatining barqaror o‘sayotganini hamda chiqindilar hajmi ham mutanosib ravishda ortayotganini ko‘rsatadi[1]. Bugungi kunda poliuretan mahsulotlari qurilish, avtomobilsozlik, aviatsiya, elektrotexnika, neft-gaz, tog'-kon sanoati, tibbiyot, poyabzal sanoati, mebel ishlab chiqarish va qadoqlash texnologiyalarida keng qo‘llaniladi. Jahon bozorida eng katta ulushni mos ravishda yumshoq ko‘piklar (52 %), qattiq ko‘piklar (48 %) tashkil etadi ushbu polimerlar qurilish sanoatida issiqlik izolyatsiyasi uchun, avtomobil sanoatida amortizatsion detallar uchun, konchilik sanoatida esa yedrilishga chidamli detallar, roliklar, konveyer lentalari va siltama elaklar ishlab chiqarishda keng foydalaniladi shu bilan birga poliuretanlarning ekspluatatsiya muddati tugagach, katta miqdorda sanoat va maishiy chiqindilar hosil bo‘ladi. Termoreaktiv poliuretanlar uch o‘lchamli tikilgan makromolekulyar tuzilishga ega bo‘lishi ularni oddiy termoplastlar singari qayta ishlash usullarini mavjud emasligi sababli poliuretan chiqindilarini qayta ishlash ekologik va iqtisodiy nuqtai nazardan dolzarb muammo hisoblanadi. So‘nggi yillarda ushbu yo‘nalishda mexanik, fizik, kimyoviy, termokimyoviy va biologik qayta ishlash texnologiyalari faol rivojlanmoqda[2]. Mexanik qayta ishlash maydalash va maydalangan poliuretan zarrachalarini yangi kompozitsiyalar tarkibida to‘ldiruvchi sifatida qo‘llashga asoslanadi. Ushbu usulning asosiy afzalliklari texnologiyaning soddaligi, energiya sarfining pastligi va ekologik xavfsizligi bo‘lsa biroq maydalangan zarrachalar polimer zanjiri bilan yetarlicha bog‘lanmasligi sababli yakuniy mahsulotning mexanik mustahkamligi va uzoq muddatli ekspluatatsion xossalarining sezilarli darajada pasayishi kuzatiladi. Kimyoviy qayta ishlash (glikoliz, aminoliz, alkogoliz va gidroliz) poliuretan makromolekulalarini kimyoviy parchalanishi orqali poliollar va boshqa qimmatli komponentlarni qayta tiklash imkonini beradigan ushbu usullar ichida glikoliz sanoat miqyosida eng istiqbolli texnologiya sifatida e'tirof etilgan, chunki u yuqori darajada poliollarni regeneratsiya qilish imkonini berib termokimyoviy qayta ishlash usuli esa poliuretan chiqindilarini harorat tasirida suyqlantrish yoki qisman destruksiyaga uchratish orqali yangi kompozitsion materiallar olish imkonini beradigan usuldir. Ushbu texnologiya mexanik qayta ishlashga nisbatan yaxshiroq strukturaviy xolatni saqlashga, kimyoviy qayta ishlashga qaraganda kimyoviy reagentlar sarfini tejashga imkon beradi va natijada energiya sarfi kamayadi, texnologik jarayon soddalashadi va ikkilamchi poliuretan asosidagi yuqori mustahkam kompozitsiyalar olish imkoniyati yaratiladi[3]. Poliuretanlar chiqindilarini qayta ishlashdagi asosiy muammolardan biri yuqori harorat ta'sirida suyqlanmasdan, termooksidlanish, zanjirlarning uzilishi, uretan guruhlarining yiriklashishi, hamda molekulyar massaning kamayishi va erkin radikallar hosil bo‘lishi hisobiga yuqori haroratda parchalanishidir. Material tarkibida boradigan ushbu jarayonlar mexanik mustahkamligi, qattiqligi va xaroratga bardoshliligini sezilarli darajada pasayishi sabab bo‘ladi, ushbu kamchiliklarni kamaytirish uchun turli xil stabilizatorlardan foydalanib tayyorlangan namunalarning fizik-mexanik xossalari zamonaviy qurlimalar yordamida tahlil qilindi xususan fosfatli stabilizatorlar ishtirokida, parchalanish, suyuqlanish haroratini ortishi, termooksidlanish reaksiyalarini sekinlashtiradi hamda erkin radikallarning aktivlanishi ortishiga sabab bo‘ladi. Rux stearati esa

1-jadval

Qayta ishlangan poliuretan namunalarining miqdoriy tarkibi

№	Namuna nomi	Poliuretan chiqindisi miqdori (gr)	4,4-metilendifenil diizosiyanat (gr)	Fosfat kislotasining tributil efiri(gr)	Rux stearati (gr)
1	PU-1	81,8	18	0,2	0,2
2	PU-2	81,6	18	0,4	0,4
3	PU-3	81,4	18	0,6	0,6
4	PU-4	81,2	18	0,8	0,8
5	PU-5	81	18	1,0	1,0

Izoh bu yerda: *PU-1,2,3,4,5lar turli miqdor tarkibga ega qayta ishlangan poliuretan namunalari.*



1-rasm: Poliuretan namunalarinig mikroskopik tasviri
1-toza, 2-bo'glovchi yordamida qayta ishlangan, 3- fosfat kislotasining tributil efirli, 4- rux stearatli stabilizator yordamida qayta ishlangan poliuretan namunalarning mikroskopik tasviri

issiqlikka bardoshli stabilizator sifatida qo'llaniladi, polimer zanjirlarining parchalanish tezligini kamaytiradi, qovushqoqlikni barqarorlashtiradi va material yuzasining benuqson bo'lishini taminlaydi ushbu stabilizatorlarning sinergik ta'siri natijasida poliuretan kompozitsiyalarining shishalanish harorati (T_g), termooksidlanish boshlanish harorati (T_d) va maksimal termodestruksiya harorati (T_{max}) oshishi kuzatiladi, bu esa materialning uzoq muddatli ekspluatatsion barqarorligini sezilarli ravishda yaxshilaydi[4]. Shu sababli, poliuretan chiqindilarini termokimyoviy qayta ishlash jarayonida samarali stabilizatorlarni tanlash, ularning optimal konsentratsiyasini aniqlash hamda qayta ishlangan kompozitsiyalarning termik va fizik-mexanik xossalariga ta'siri ilmiy va amaliy jihatdan tadqiq qilindi. Quyidagi jadvalda stabilizatorlar ishtirokida qayta ishlab tayyorlangan poliuretan namunalarining tarkibi keltrilgan.

Mikroskopik tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, stabilizatorlardan foydalanish poliuretan chiqindilari asosida tayyorlangan namunalarning gomogenligini oshirib, g'ovaklikni kamaytiradi va fazalararo bog'lanishni kuchaytiradi, eng yuqori zichlik va termik barqarorlik rux stearati qo'llangan namunada kuzatildi, bu uning termooksidlanishga qarshi samarali stabilizatsiyalovchi ta'siri hamda makromolekulyar tuzilmani mustahkamlash xususiyati bilan izohlanadi. Tributilfosfat ham termooksidlanish jarayonini samarali sekinlashtirdi, biroq yuzasidagi ortiqcha mikro yoriqlar zichlashtirish va mexanik xossalarni rux stearatiga nisbatan biroz pastroq bo'lishiga olib keldi ushbu natijalar rux stearatining qayta ishlangan poliuretan kompozitsiyalarining ekspluatatsion xossalarini yaxshilovchi samarali stabilizator ekanligi aniqlandi.

Metodlar

Tadqiqotda poliuretan chiqindilarini termokimyoviy qayta ishlash jarayonida stabilizator konsentratsiyasining termik barqarorlikka ta'siri o'rganildi. Boshlang'ich xomashyo sifatida poliuretan chiqindilari olinib, ularni 110–120°C haroratda suyuqlantirib hosil bo'lgan suyuqlanmaga 20 % miqdorda 4,4'-metilendifenildiizosiyanat qo'shildi va aralashma 1600 ayl/min tezlikda maxsus aralashtirgich yordamida 2–3 minut vaqt davomida gomogen holat hosil bo'lguncha aralashtirildi. Termik stabilizator sifatida – fosfat kislotasining tributil efiri ($((C_4H_9O)_3PO)$) rux stearati ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) qo'llanildi stabilizatorlar polimer massasiga nisbatan 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 va 1,0% konsentratsiyalarda alohida-alohida kiritilib, qo'shimcha 1–2 minut vaqt davomida 1500 ayl/min tezlikda aralashtirildi va tayyor kompozitsiya hosil qilinib sanoat qoliplariga quyildi. Stabilizatorlarning termodestruksiya kinetikasiga ta'siri termogravimetrik tahlil (TGA) hamda differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) usullari orqali aniqlandi olingan natijalarga ko'ra stabilizator

konsentratsiyasi qayta ishlangan poliuretan molekulasining termik barqarorligi va fizik-mexanik xossalariga ta'siri tadqiq qilindi[5,6].

Natijalar

4,4'-metilendifenildiizosiyanat asosidagi termoreaktiv poliuretan chiqindilarini termokimyoviy qayta ishlash jarayonida stabilizatorlarning termik va fizik-mexanik xossalarga ta'siri kompleks ravishda tadqiq qilindi. Poliuretan chiqindilarining 110–120 °C haroratda termik yumshatilishi makromolekulyar zanjirlarning to'liq destruksiyasini yuzaga keltirmasdan materialni gomogen suyuqlanmaga o'tkazishga imkon berdi. Suyuqlanma tarkibiga 20 % MDI qo'shilishi natijasida erkin izosiyanat guruhlari soni ortib, makromolekulyar zanjirlar o'rtasida qo'shimcha uretan bog'lari hosil bo'lishi uchun reaksion markazlar yuzaga keldi. Bu jarayon qayta ishlangan poliuretan tarkibida strukturaviy yaxlitlikni tiklash va zanjirlararo bog'lanishlarni kuchaytirishga xizmat qildi[7]. Reaksiya aralashmasining 1500 ayl/min tezlikda intensiv aralashtirilishi komponentlarning bir tekis taqsimlanishini ta'minlab, lokal konsentratsiya gradientlarini kamaytirdi va gomogen kompozitsiya hosil bo'lishiga yordam berdi. Tributilfosfat ($(C_4H_9O)_3PO$) va rux stearati ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) 0,2–1,0% konsentratsiyalar oralig'ida qo'llanilganda ularning poliuretan strukturasiga ta'siri kuzatildi.

Tayyorlangan 10 dona poliuretan namunalarining qattiqlik darajasining qiymatlari 2-jadvalda keltirilgan.

Yuqoridagi jadval asosida olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, 0,8 % li kon sentratsiya har ikkala stabilizator uchun ham qayta ishlangan

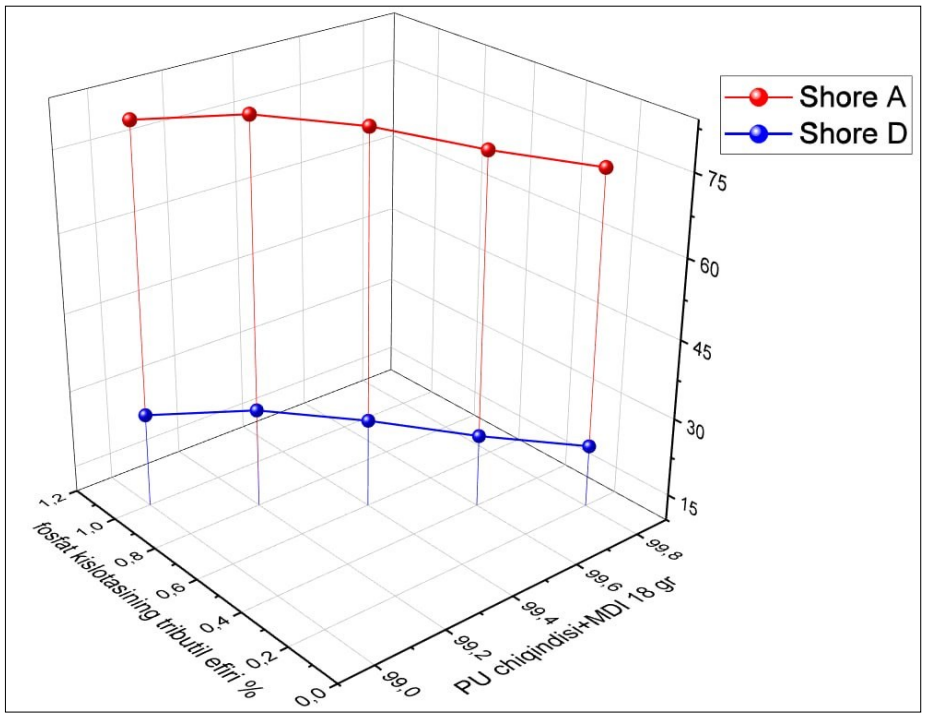
2-jadval

Stabilizatorning miqdorini qattiqlik darajasiga bog'liqligi

№	Namunalar nomi	Shore A/D			
		fosfat kislotasining tributil efiri		rux stearati	
1	PU-1	74	22	72	21
2	PU-2	77	24	75	23
3	PU-3	81	27	79	26
4	PU-4	83	29	82	27
5	PU-5	82	28	81	26

poliuretan kompozitsiyasining qattiqlik xossalarini optimallashtirish nuqtai nazaridan eng maqbul miqdor hisoblanadi. Shu bilan birga, fosfat kislotasining tributil efiri qattiqlikni oshirish bo'yicha rux stearatiga nisbatan biroz yuqori samaradorlik namoyon etdi, bu esa uning organofosforli termik stabilizator sifatidagi yuqori antioksidant faolligi va polimer strukturasining termooksidlanish barqarorligini samaraliroq oshirishi bilan izohlandi.

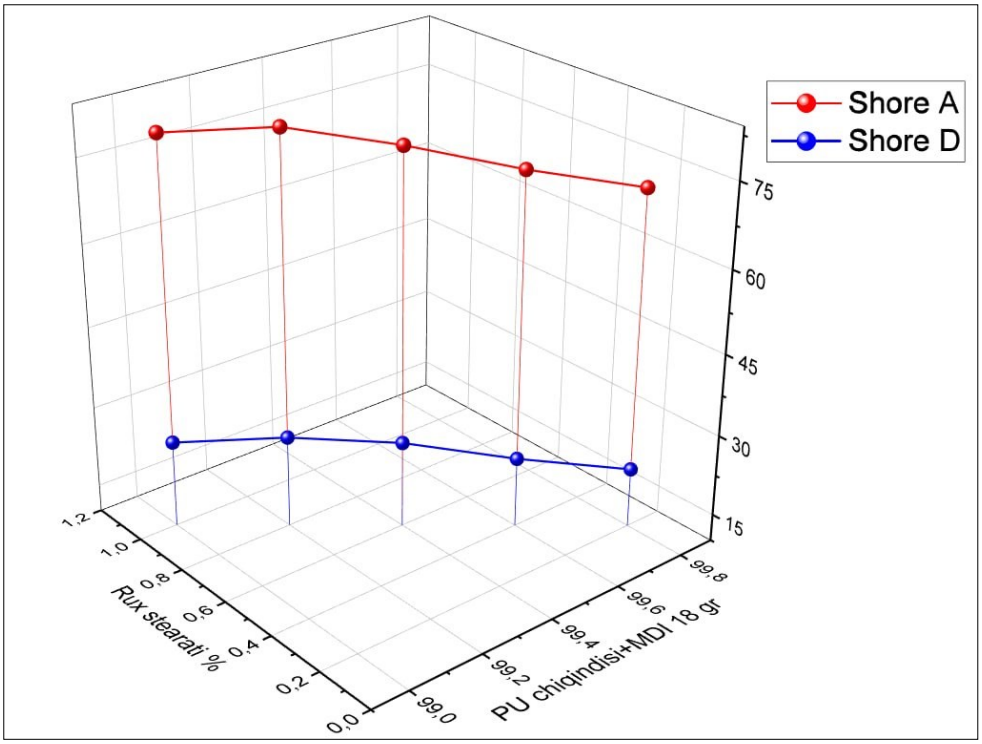
Quyidagi rasmda stabilizator sifatida kislotasining tributil efiri ($(C_4H_9O)_3PO$) konsentratsiyasining qayta ishlangan MDI asosidagi poliuretan suyuqlanmasiga qo'shish orqali qattiqlik darajasi (Shore A / D)ga ta'siri o'rganilgan.



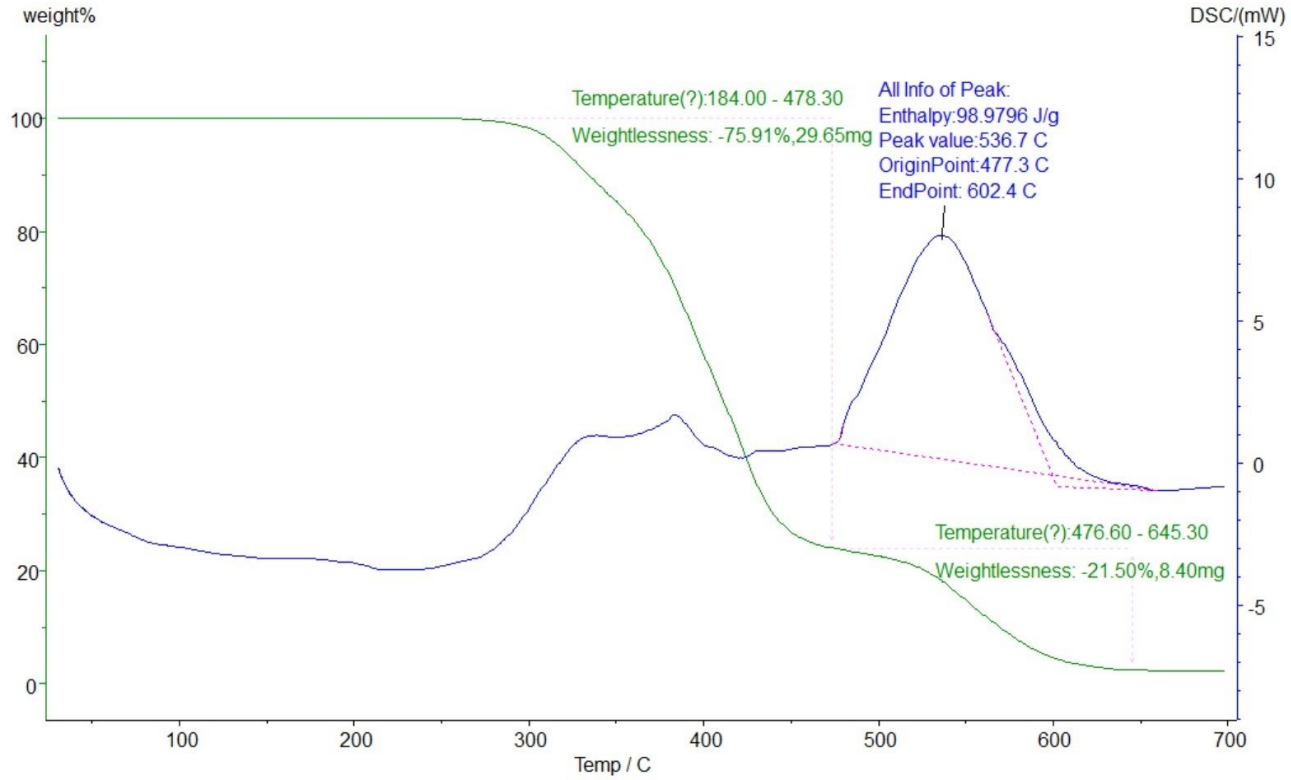
2-rasm. Fosfat kislotasining tributil efiri miqdorining qattiqlik darajasiga bog'liqligi

Grafikdan ko'rinadiki, tributilfosfat miqdori 0,2 dan 0,8 % gacha oshirilganda qattiqlik qiymatlari izchil ortib, polimer zanjirining strukturaviy yaxlitligi va deformatsiyaga chidamliligi yaxshilangan. Ushbu konsentratsiyada maksimal qattiqlik qayd etilib, tributilfosfatning makromolekulyar segmentlararo o'zaro ta'sirni barqarorlashtirishi hamda qayta ishlash jarayonida termooksidlanish ta'sirida yuz beradigan zanjir uzilishlarini cheklashi aniqlandi[8].

Rux stearati konsentratsiyasining poliuretan suyuqlanmasiga qo'shish orqali qattiqlik darajasi (Shore A /D)ga ta'siri keltrilgan grafikdan ko'rinadiki, 4-namaunada maksimal qattiqlik ko'rsatkichlari qayd etilgan bo'lib, bu rux stearatining termik stabilizatsiyalovchi va ichki moylovchi xususiyatlari sababli qayta ishlash jarayonida makromolekulyar zanjirlarning termooksidlanish va termodestruksiya jarayonlarini cheklashi bilan izohlanadi. 1,0 %li konsentratsiyada qattiqlikning biroz kamayishi esa ortiqcha stabilizatorning polimer fazasida bir tekis dispersiyalanmasligi hamda segmentlar harakatchanligini oshirishi na-



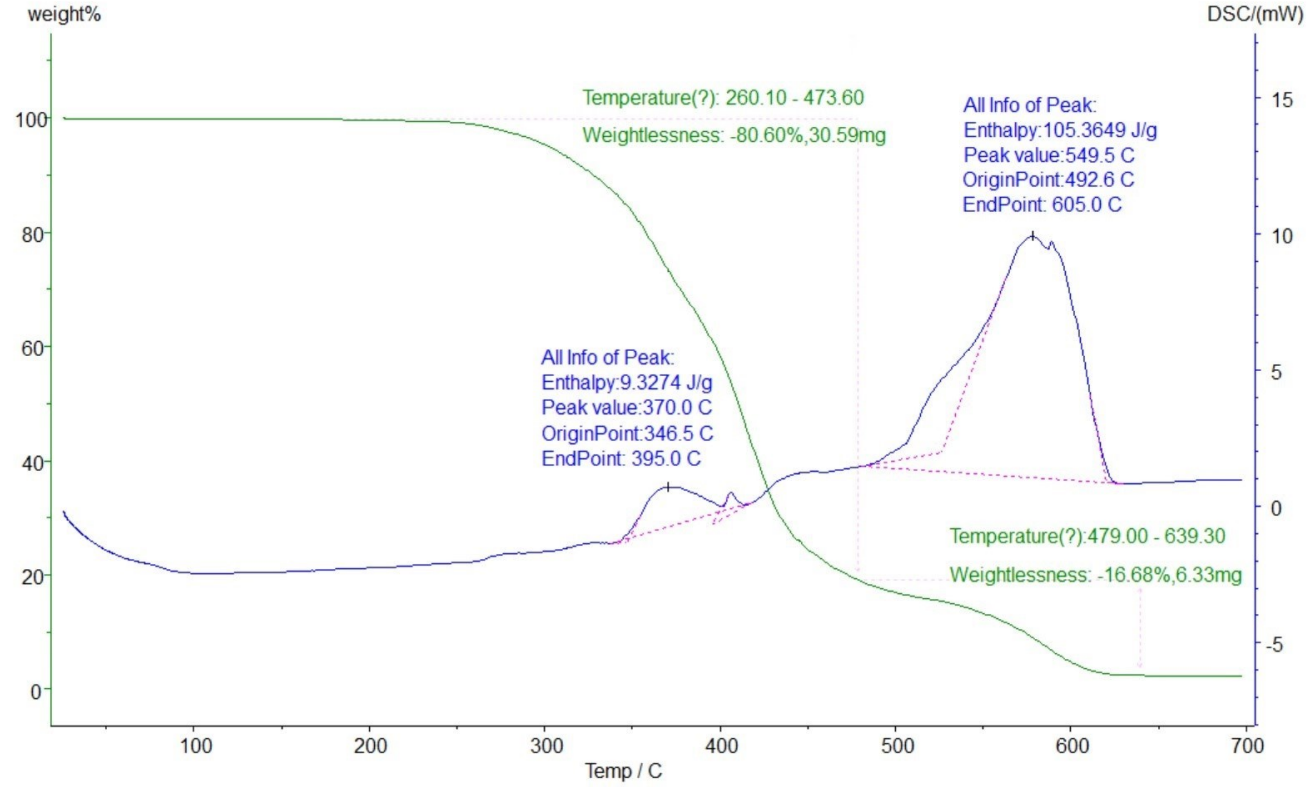
3-rasm. Rux stearati miqdorining qattiqlik darajasiga bog‘liqligi



4-rasm. Toza poliuretan namunasining termogravometrik tasviri

tijasida strukturaviy zichlikning qisman pasayishi bilan bog'liqligi aniqlandi [9].

TG egri chizig'i toza poliuretan namunasining termik parchalanishi ko'p bosqichli mexanizm asosida kechishini ko'rsatib dastlabki bosqichda 184,0–478,3 °C harorat oralig'ida namunaning asosiy termooksidlanish jarayoni kuzatilib, massa yo'qotilishi 75,91 % ni tashkil etdi. Ushbu bosqich uretan bog'lari (–NH–CO–O–) ning uzilishi, izosiyanat va poliol segmentlarining depolimerlanishi hamda uchuvchan mahsulotlarning ajralib chiqishi bilan tavsiflanadi. Keyingi bosqichda 476,6–645,3 °C oralig'ida qo'shimcha 21,50 % massa kamayishi qayd etildi, bu aromatik uglerodli qoldiqning oksidlanishi va karbonlashgan strukturaning yakuniy termik destruksiyasi bilan izohlanib DSC egri chizig'ida 536,7 °C da maksimal issiqlik effekti kuzatilib, pik nuqtasi 98,98 J/g entalpiyaga ega bo'ldi[10]. Mazkur termik effekt yuqori molekulyar segmentlarning parchalanishi hamda qoldiq uglerod fazasining oksidlanish jarayoniga mos kelishi yakuniy qoldiq massaning juda kam bo'lishi toza poliuretan tarkibida mineral komponentlar mavjud emasligini hamda materialning yuqori haroratlarda deyarli to'liq termik destruksiyaga uchrashini ko'rsatadi. Olingan TG–DSC natijalari toza poliuretanning asosiy destruksiya harorati 480–540 °C oralig'ida sodir bo'lishini hamda materialning termik barqarorligi asosan uretan bog'larining barqarorligi va aromatik segmentlarning oksidlanish xususiyatlari bilan belgilanishini ko'rishimiz mumkin.

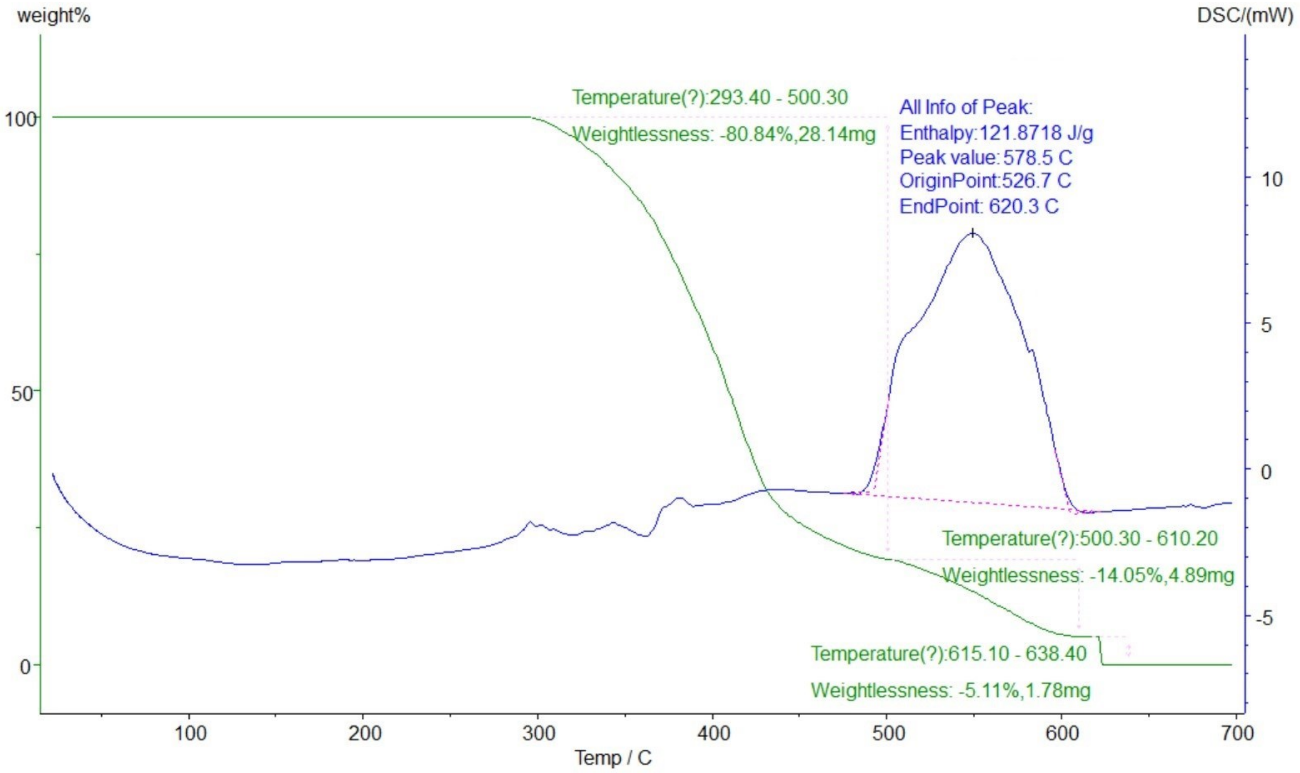


5-rasm. Tributilefirli poliuretan namunasining termogravometrik tasviri

Ushbu rasmda qattiqlik darajasi eng optimal (0,8%) deb topilgan tributilefirli stabilizator yordamida qayta ishlangan poliuretan namunasining termik o'tish haroratlari keltrilgan bo'lib unda TG egri chizig'iga ko'ra, termik desturksiya 260,1–473,6°C harorat oralig'ida bo'lib namuna massasining 80,60% yo'qotilishi kuzatildi. 479,0–639,3°C intervalida aromatik uglerodli qoldiqning oksidlanishi natijasida qo'shimcha 16,68% massa kamayishi qayd etilib DSC termogrammasida 492,6°C da 9,372 J/g entalpiyaga ega bo'lgib makromolekulyar bog'lari hamda qattiq segmentlarning termik parchalanishini bilan izohlandi[11].

Ushbu tahlil uchun ham rux stearat asosida tayyorlangan 0,8%li poliuretan namunasining termogravimetrik tahlil natijalari kletrilgan bo'lib unga ko'ra, namunada termik parchalanish uch bosqichda sodir bo'ladi. 293–500 °C oralig'ida asosiy destruksiya jarayoni kuzatilib, massa yo'qotilishi 80,84 % ni tashkil etdi. Ushbu bosqich poliuretan tarkibidagi uretan bog'lari (–NH–CO–O–) hamda yumshoq segmentlarning termooksidlanish va depolimerlanish jarayonlari bilan izohlanadi. DSC egri chizig'ida 527,6 °C da maksimal endotermik/ekzotermik effekt (ΔH = 121,78 J/g) qayd etilib, bu qoldiq aromatik fragmentlarning parchalanishi va uglerodlangan qoldiqning oksidlanish jarayoniga mos keladi. 500–610 °C oralig'ida qo'shimcha 14,05 % massa kamayishi, 615–638 °C da esa yakuniy -5,11 % massa yo'qotilishi kuzatilib, noorganik qoldiqning yuqori haroratdagi termik o'zgarishlari bilan bog'liq ekanligi aniqlandi. Olingan natijalar rux stearat qo'shilishi poliuretan matritsasining termik barqarorligini oshirishini, destruksiya haroratini yuqori diapazonga siljitishini hamda yuqori haroratlarda uglerodli himoya qatlami hosil bo'lishini ta'minlashini ko'rsatadi [12,13]. Bu esa materialning yuqori harorat sharoitlarida ishlash samaradorligini yaxshilashga xizmat qiladi.

Toza, tributilefirli, rux stearatli stabilizatorlar ishtirokida qayta ishlangan poliuretan namunalarining derivatografik tahlillari amalga oshirildi va uning qiymatlari 3-jadvalda keltirilgan.



6-rasm. Rux stearatli poliuretan namunasining termogravometrik tasviri

3-jadval

Poliuretan namunalarining DTGA va DSK egri chiziqlari tahlil natijalari

№	Tempera tura,°C	Yo‘qotilgan massa, %			Moddaning parchalanish tezligi, mg/min			Sarflanadigan energiya miqdori (μV*s/mg)		
		PU -1	PU -2	PU -3	PU -1	PU -2	PU -3	PU -1	PU -2	PU -3
1	50	2,91	2,98	1,45	0,122	0,126	0,119	1,45	1,24	1,56
2	100	7,52	8,61	6,18	0,402	0,461	0,302	2,48	2,02	2,62
3	150	15,23	18,51	12,50	0,651	0,564	0,651	2,68	2,36	2,74
4	200	27,41	29,11	20,26	0,696	0,656	0,696	2,71	1,98	2,86
5	250	36,54	36,28	32,58	3,023	3,021	3,023	3,25	3,12	3,72
6	300	45,78	48,34	39,43	3,321	3,235	3,321	6,98	6,62	7,04
7	350	51,25	52,45	44,75	3,891	3,984	3,891	7,02	7,09	7,56
8	400	60,07	68,22	52,86	3,894	3,995	3,894	7,82	7,63	7,82
9	450	72,68	79,51	68,42	4,015	4,114	4,014	8,12	8,03	8,56
10	500	80,84	63,08	80,60	4,198	3,909	4,108	8,74	6,08	8,92
11	550	67,45	52,61	61,15	2,845	2,894	3,845	6,98	4,88	7,98
12	600	44,05	37,89	40,85	1,754	1,954	2,754	5,47	3,56	6,85
13	650	32,11	21,50	14,05	1,491	1,599	1,561	2,59	2,08	3,59
14	700	6,33	5,11	5,11	0,102	0,113	0,098	1,89	0,90	2,31

Izoh:bu yerda PU-1 toza, PU-2, PU-3 stabilizatorlar ishtriokida qayta ishlangan poliuretan namunalari.

Olingan DTGA va DSK natijalari shuni ko'rsatadiki, toza poliuretan namunasining makromolekulasi harakatchanligi yaxshi ammo termik barqarorligi biroz pasroq bo‘lib stabilizatorlar yordamida qayta ishlangan (PU-2,3) poliuretan namunalarining destruksiya tezligini sekin va destruksiya uchun zarur bo'lgan aktivlanish energiyasi (endotermik effekti)ham sezilarli darajada yuqori bo‘lib, materialning yuqori haroratlarga chidamli bo‘lganligini ko’rishimiz mumkin bo‘ladi.

Natijalarni muhokama qilish

Ushbu stabilizatorlar ishtirokida makromolekulyar zanjirlarning termooksidlanish jarayoniga nisbatan chidamliligi ortganligini hamda zanjir uzilishi reaksiyalarining sekinlashganligini aniqlandi. Bog‘lovchi va stabilizatorlarning qo‘llanilishi natijasida qayta ishlangan poliuretan materialining makromolekulalararo o‘zaro ta'sir kuchayib, termik, kimyoviy barqarorligi oshishi aniqlandi bunga sabab qattiq segmentlar ulushi va fazalararo bog‘lanish darajasiga bevosita bog‘liqligidir.

Tributilfosfat ($(C_4H_9O)_3PO$) qo‘llangan namunalarda termooksidlanish jarayonining sekinlashishi fosfor saqlovchi stabilizatorlarning ikkilamchi antioksidant sifatida namoyon bo‘ladigan mexanizmi bilan tushuntiriladi. Bunday stabilizatorlar termooksidlanish davomida hosil bo‘ladigan zanjir uzilishiga tasir ko‘rsatib, oksidlanish tezligini pasaytiradi. Natijada karbonil guruhlari hosil bo‘lishi va makromolekulyar destruktsiyasi sekinlashishiga sabab bo‘ladi, bu esa uretan bog‘larining yuqori darajada saqlanishiga va termik barqarorlikning ortishiga olib keladi. Tadqiqot davomida fosforli stabilizatorlar poliuretanlarning ekspluatatsion muddatini uzaytirishi, rux stearate esa modifikatsiyalangan namunalarning yuqori termik barqarorlikga yetishi aniqlandi. Buni rux stearatining metall-karboksilat tabiatiga ega stabilizator sifatida katalitik parchalanishini boshqarish, radikal reaksiyalarni susaytirishi hamda fazalararo adgeziyani kuchaytirishi tadqiq qilindi. Mikroskopik kuzatuvlarda aniqlangan g‘ovaklar sonining kamayishi va strukturaning zichlashishi issiqlik almashinuvining bir tekis taqsimlanishini ta'minlaydi hamda material tarkibida qo’shimcha nuqsonlar hosil bo‘lishini kamaytiradi. Natijada termodestruksiya tezligi pasayib, aromatik MDI fragmentlari va uretan segmentlarining saqlanish darajasi ortadi[14,15]. Olingan natijalar mikroskopik kuzatuvlar va termik tahlil ma'lumotlari o‘rtasida kuchli korrelyatsiya mavjudligini ko‘rishimiz mumkin. Namuna yuzasida mikro g’ovaklarning kamayishi, zichlashishi va fazalararo bog‘lanishning kuchayishi termik parchalanishga bevosita bog‘liq bo‘lib, bu polimer kompozitsiyasining strukturaviy yaxlitligini saqlab qolishga xizmat qiladi. Ayniqsa, rux stearati qo‘llangan namunalarda kuzatilgan gomogen tuzilma va minimal mikrodefektlar yuqori termik barqarorlikning asosiy omillaridan biri hisoblanadi. Umuman olganda, ushbu tadqiqot natijalari termokimyoviy qayta ishlash jarayonida tributilfosfat va rux stearatidan foydalanish MDI asosidagi qayta ishlangan poliuretanlarning termo-oksidlanish destruksiyasini samarali kamaytrib, makromolekulani barqarorlashtirishini hamda yuqori haroratlarda ekspluatatsion xossalarini sezilarli darajada oshirishiga imkoniyat yaratishi aniqlandi.

Xulosa

Olib borilgan tadqiqotlar natijasida 4,4'-metilendifenildiizosiyanat asosli poliuretan chiqindilarini termokimyoviy qayta ishlash jarayonida qo'llanilgan stabilizatorlarli namunalarning mikroskopik tahlili, qattiqlik darajasi, termik barqarorlik va fizik-mexanik xossalarga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. 110–120 °C haroratda amalga oshirilgan termokimyoviy suyuqlantrish va 18% MDI bilan zanjirni qayta tiklash jarayoni natijasida polimer zanjirida yangi uretan bog'lari hosil bo'lib, qayta ishlangan poliuretan kompozitsiyasining strukturaviy yaxlitligi tiklandi hamda zanjirlararo bog'lanish zichligi ortdi. Termik tahlillar shuni ko'rsatdiki, stabilizator qo'llanilmagan namunalarda yumshoq segmentlar ulushining ko’p bo’lishi makromolekulyar zanjirlarning harakatchanligini kuchaytirganligi, termodestruksiyani nisbatan past haroratlarda boshlanishini ko’rsatadi. Bu holat uretan va efir bog'larining termik uzilish energiyasining kamayishi hamda erkin radikal oksidlanish reaksiyalarining tezlashishi bilan izohlanadi. Bunga qarama-qarshi ravishda, 0,8 % tributilfosfat, rux stearati yordamida modifikatsiyalangan namunlarda termodestruksiya jarayonining yuqori haroratlar tomon siljishi kuzatildi. Rux stearati bilan olingan natijalar tributilfosfat bilan solishtirilganda yuqoriroq termik barqarorlikni namoyon etdi. Termik tahlil va fizik-mexanik tadqiqotlar natijasida 0,8 % tributilfosfat MDI asosidagi qayta ishlangan termoreaktiv poliuretanlar uchun optimal stabilizator konsentratsiyasi ekanligi ilmiy jihatdan asoslandi. Ushbu konsentratsiyada makromolekulyar tarmoqning destruksiyalanishi minimal darajaga tushdi, sirt qattiqligi va strukturaviy yaxlitlik maksimal qiymatlarga erishdi. Stabilizator miqdorini bundan yuqori oshirish esa qo'shimcha ijobiy samara bermasligi, aksincha ayrim fizik-mexanik ko'rsatkichlarning pasayishiga olib kelishi kuzatildi. Tadqiq qilingan termokimyoviy qayta ishlash usuli va tributilfosfat asosidagi stabilizatsiyalash MDI asosidagi poliuretan chiqindilaridan yuqori termik barqarorlikka, yuqori qattiqlikka va uzoq muddatli ekspluatatsion xossalarga ega kompozitsion materiallar olish imkonini berishi aniqlandi. Olingan natijalar ushbu materiallardan 120–150 °C gacha bo'lgan haroratlarda ishlaydigan mashinasozlik, tog'-kon sanoati, transport, kimyo sanoati va aşınishga chidamli sanoat detallarini ishlab chiqarishda samarali foydalanish mumkinligini ko'rsatadi hamda poliuretan chiqindilarini resurs tejovchi va ekologik xavfsiz texnologiyalar asosida qayta ishlash imkoniyati yaratildi.

Bibliografik ro'yxati:

1. Wei K. et al. Dual dynamic bonds approach for polyurethane recycling and self-healing of emulsified asphalt //Science of The Total Environment. – 2023. – T. 885. – C. 163915.
2. Dong F. et al. Conventional properties, rheological characteristics, and thermal performance of waste polyurethane modified asphalt with butyl rubber //Construction and Building Materials. – 2024. – T. 411. – C. 134460.
3. Шодиев А. Ф. Изучение влияния количества 4, 4-метилдифенилдиизо цианата при переработке термореактивных полиуретановых отходов //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2023. – Т. 4. – №. 4. – С. 47-51. A.H.
4. Mendiburu-Valor E. et al. Synthesis and characterization of sustainable polyurethanes from renewable and recycled feedstocks //Journal of Cleaner Production. – 2023. – Т. 400. – С. 136749.
5. Вихарева И. Н. Формирование полимерных материалов повышенной термостабильности //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2024. – Т. 16. – №. 2. – С. 136-147.
6. Мохирева К. А. и др. Механическое поведение полиуретановых композитов с наноразмерными наполнителями //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – №. 2. – С. 133-141.
7. Recupido F. et al. Post-consumer recycling of Tetra Pak®: Starting a “new life” as filler in sustainable polyurethane foams //Food Packaging and Shelf Life. – 2023. – Т. 40. – С. 101175.
8. Бухаркина Т. В. и др. Recycling of solid residue of pyrolysis of car tires //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2023. – Т. 334. – №. 8. – С. 79-90.
9. Polecki K. et al. Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches //Materials. – 2026. – Т. 19. – №. 4. – С. 805.
10. Данилаев М. П. и др. Механические свойства оснастки на основе полимерной композиции из полиуретанов с дисперсным наполнением //Ползуновский вестник. – 2025. – №. 3. – С. 205-211.
11. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix //Chemical Methodologies. – 2025. – Т. 9. – №. 6. – С. 448-460.

12. Juraev I. I. et al. Дериватографическое исследование термостабилизации поливинилхлорида //Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine. – 2024. – Т. 3. – №. 4. – С. 47-67.
13. Juraev S., Mukhiddinov B. Results of derivatographic and ir-spectroscopic investigations of wear-out rubber of car tires after pyrolysis processing //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1112. – №. 1. – С. 012152.
14. Jo'raev S. T. et al. Thermogravimetric analysis of waste car tires. – 2023.
15. Mendiburu-Valor E. et al. Synthesis and characterization of sustainable polyurethanes from renewable and recycled feedstocks //Journal of Cleaner Production. – 2023. – Т. 400. – С. 136749.



Мухиддинов Баходир Фахриддинович – профессор кафедры «Химическая технология», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор химических наук, профессор
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-2411-2914

Bakhodir Fakhriddinovich Mukhiddinov – Professor of Department “Chemical technology”, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Chemistry Science, Professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-2411-2914

Muxiddinov Baxodir Faxriddinovich – “Kimyoviy texnologiya” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, kimyo fanlari doktori, Professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-2411-2914



Шодиев Аслиддин Фахриддин угли – заместитель декана Факультета агроинженерии и коммуникационных технологий, Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-7776-1950

Asliddin Fakhriddin ugli Shodiev – Deputy Dean of the Faculty of Agroengineering and Communication Technologies, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0006-7776-1950

Shodiyev Asliddin Faxriddin o‘g‘li – Agromuhandislik xa kommunikatsion texnologiyalar fakulteti dekan o‘rinbosari, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, PhD
E-mail:
ORCID: 0009-0006-7776-1950



Джураев Шохрух Тулкинович – декан Факультета агроинженерии и коммуникационных технологий, Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994

Shohrukh Tulqinovich Jurayev – Dean of the Faculty of Agroengineering and Communication Technologies, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Science, Professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994

Jo‘rayev Shohrux To‘lqinovich – Agromuhandislik xa kommunikatsion texnologiyalar fakulteti dekani,Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: info@nsumt.uz
ORCID: 0009-0002-0839-5994



Исаев Дониёр Тошботирович – доцент кафедры «Технология машиностроения», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
E-mail: doniyorisayev8690@gmail.com
ORCID:

Isaev Doniyor Toshbotirovich – Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Navoi State University of Mining and Technology, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: doniyorisayev8690@gmail.com
ORCID:

Isayev Doniyor Toshbotirovich – «Mashinasozlik texnologiyasi» kafedrasi dotsenti, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: doniyorisayev8690@gmail.com
ORCID:

UDC 544.526.5 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.12

GLOBAL RESEARCH TRENDS IN PHOTOCATALYTIC DEGRADATION USING SEMICONDUCTOR NANOMATERIALS: A BIBLIOGRAPHIC ANALYSIS

F. Mukhtar, O.A. Jumaev, M.T. Ismoilov, A.K. Rakhimov

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *Photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials has emerged as a highly promising and sustainable approach for addressing global water pollution challenges. Owing to their exceptional optical, electronic, and surface properties, semiconductor-based photocatalysts have attracted significant scientific attention for the efficient degradation of hazardous organic pollutants. To evaluate the research development and emerging trends in this rapidly expanding field, a comprehensive bibliometric analysis was conducted using data retrieved from the Scopus database covering the period from 2021 to 2026. After systematic screening and refinement, a total of 704 relevant publications, including research articles and review papers, were selected for analysis. Bibliometric evaluation was performed using VOSviewer and Bibliometrix (R package) to examine publication growth, citation performance, document type distribution, subject category contributions, leading journals, highly cited publications, and keyword co-occurrence patterns. The results reveal a strong and continuous increase in both publication output and citation impact, highlighting growing global scientific interest in semiconductor photocatalysis for environmental remediation. Research articles represented the dominant document type, while environmental science emerged as the leading subject category, confirming the field's strong environmental focus. Keyword mapping identified major research themes centered on photocatalysis, nanomaterials, pollutant degradation, water treatment, heterojunction engineering, and green synthesis, demonstrating the multidisciplinary and evolving nature of this domain. The analysis further identified influential journals and landmark publications that have significantly shaped research progress. Overall, this bibliometric study provides valuable insight into the scientific evolution, current research hotspots, and future opportunities for semiconductor nanomaterial-based photocatalytic technologies in sustainable wastewater treatment.*

Key words: *photocatalysis; semiconductor nanomaterials; bibliometric analysis; pollutant degradation; VOSviewer; Scopus database.*

YARIMO‘TKAZGICHLI NANOMATERIALLAR YORDAMIDA FOTOKATALITIK PARCHALANISHGA OID GLOBAL TADQIQOT TENDENSIYALARI: BIBLIOGRAFIK TAHLIL

F. Muxtar, O.A. Jumayev, M.T. Ismoilov, A.K. Raximov

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O‘zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Yarimo‘tkazgichli nanomateriallar yordamida fotokatalitik parchalash global suv ifloslanishi muammolarini hal etishning istiqbolli va barqaror yondashuvi sifatida maydonga chiqdi. O‘zining noyob optik, elektron va sirt xususiyatlari tufayli yarimo‘tkazgich asosidagi fotokatalizatorlar xavfli organik ifloslantiruvchilarni samarali parchalash uchun katta ilmiy qiziqish uyg‘otdi. Ushbu jadal rivojlanayotgan sohadagi tadqiqotlarning rivojlanishi va yangi tendensiyalarni baholash maqsadida Scopus ma’lumotlar bazasidan 2021–2026-yillar oralig‘ini qamrab olgan ma’lumotlar asosida keng ko‘lamli bibliometrik tahlil o‘tkazildi. Tizimli saralash va tahrirlashdan so‘ng tahlil uchun jami 704 ta tegishli nashr, jumladan, tadqiqot maqolalari va sharhlar tanlab olindi. Bibliometrik tahlil nashrlar sonining o‘sishi, iqtiboslar samaradorligi, hujjat turlarining taqsimlanishi, fan toifalarining hissasi, yetakchi jurnallar, eng ko‘p iqtibos keltirilgan nashrlar va kalit so‘zlarning birgalikda uchrash qonuniyatlarini o‘rganish uchun VOSviewer va Bibliometrix (R to‘plami) yordamida amalga oshirildi. Natijalar nashrlar soni hamda iqtiboslar ta’sirining barqaror va uzluksiz o‘sishini ko‘rsatib, bu atrof-muhitni qayta tiklashda yarimo‘tkazgichli fotokatalizga bo‘lgan global ilmiy qiziqish ortib borayotganini ta’kidlaydi. Tadqiqot maqolalari asosiy hujjat turi bo‘lib, atrof-muhitshunoslik esa yetakchi fan yo‘nalishi sifatida ajralib turdi, bu sohaning ekologiyaga kuchli e’tibor qaratganini tasdiqlaydi. Kalit so‘zlarni xaritalash orqali fotokataliz, nanomateriallar, ifloslantiruvchilarni parchalash, suvni tozalash, geteroo‘tish muhandisligi va yashil sintez kabi asosiy tadqiqot mavzulari aniqlandi, bu esa ushbu yo‘nalishning ko‘p tarmoqli va rivojlanib borayotgan tabiatini namoyon etadi. Tahlil, shuningdek, tadqiqot taraqqiyotini sezilarli darajada shakllantirgan nufuzli jurnallar va muhim nashrlarni ham aniqlab berdi. Umuman olganda, ushbu bibliometrik tadqiqot oqova suvlarni barqaror tozalashda yarimo‘tkazgichli nanomateriallar asosidagi fotokatalitik texnologiyalarning ilmiy evolyutsiyasi, dolzarb tadqiqot yo‘nalishlari va kelajakdagi imkoniyatlari haqida qimmatli tushuncha beradi.*

Kalit so‘zlar: *fotokataliz; yarimo‘tkazgichli nanomateriallar; bibliometrik tahlil; Ifloslantiruvchi moddalarning parchalanishi; VOSviewer; Scopus ma’lumotlar bazasi.*

ГЛОБАЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ: БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Мухтар Ф., Жумаев О.А., Исмаилов М.Т., Рахимов А.К.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *Фотокаталитическое разложение с использованием полупроводниковых наноматериалов стало перспективным и устойчивым подходом к решению глобальных проблем загрязнения воды. Благодаря своим уникальным оптическим, электронным и поверхностным свойствам, фотокатализаторы на основе полупроводников вызвали большой научный интерес в контексте эффективного разложения опасных органических загрязнителей. Для оценки развития исследований и новых тенденций в этой стремительно развивающейся области был проведен масштабный библиометрический анализ на основе данных из базы Scopus за период с 2021 по 2026 год. После систематического отбора и редактирования для анализа было выбрано в общей сложности 704 релевантных публикации, включая научные статьи и обзоры. Библиометрический анализ был выполнен с помощью VOSviewer и Bibliometrix (пакет R) для изучения роста числа публикаций, цитируемости, распределения типов документов, вклада научных дисциплин, ведущих журналов, наиболее цитируемых публикаций и закономерностей совместной встречаемости ключевых слов. Результаты показывают стабильный и непрерывный рост как числа публикаций, так и их цитируемости, что подчеркивает растущий глобальный научный интерес к полупроводниковому фотокатализу в области восстановления окружающей среды. Научные статьи стали основным типом документов, а науки об окружающей среде выделились в качестве ведущей научной дисциплины, что подтверждает сильную экологическую направленность данной области. Картирование ключевых слов выявило такие основные темы исследований, как фотокатализ, наноматериалы, разложение загрязнителей, очистка воды, инженерия гетеропереходов и "зеленый" синтез, демонстрируя многопрофильный и развивающийся характер этого направления. Анализ также определил влиятельные журналы и значимые публикации, которые в существенной степени определили прогресс исследований. В целом, данное библиометрическое исследование предоставляет ценное представление о научной эволюции, актуальных направлениях исследований и будущих возможностях фотокаталитических технологий на основе полупроводниковых наноматериалов для устойчивой очистки сточных вод.*

Ключевые слова: *фотокатализ; полупроводниковые наноматериалы; библиометрический анализ; разложение загрязняющих веществ; VOSviewer; база данных Scopus.*

Introduction

Water is one of the most valuable natural resources, playing a fundamental role in sustaining life, agriculture, industrial development, and ecological balance. However, rapid industrialization, urban expansion, and increasing human activities have significantly contributed to the contamination of water resources with a wide variety of hazardous pollutants, including synthetic dyes, pharmaceutical residues, pesticides, phenolic compounds, and other toxic organic contaminants. These pollutants pose serious risks to aquatic ecosystems and human health, making efficient wastewater treatment a global priority. Traditional water treatment methods such as adsorption, coagulation, membrane filtration, and biological treatment have been widely used; however, many of these approaches suffer from limitations including incomplete pollutant degradation, high energy requirements, secondary waste generation, and reduced efficiency against persistent organic pollutants [1].

In recent decades, photocatalytic degradation has emerged as one of the most promising advanced oxidation technologies for environmental remediation. This approach utilizes light energy to activate photocatalytic materials, generating highly reactive species capable of decomposing complex organic pollutants into less harmful or completely mineralized products such as carbon dioxide and water, as shown in Fig. 1. Compared with conventional treatment technologies, photocatalysis offers several advantages, including environmental friendliness, low chemical consumption, potential solar energy utilization, and high degradation efficiency. As a result, photocatalytic wastewater treatment has attracted considerable attention from researchers across multiple scientific disciplines [2].

Among various photocatalytic materials, semiconductor nanomaterials have gained exceptional prominence because of their unique structural, electronic, and optical properties. Their nanoscale dimensions provide a large active surface area, improved adsorption capacity, tunable band gap energy, and enhanced charge transport characteristics, all of which contribute significantly to photocatalytic performance. Semiconductor materials such as titanium dioxide (TiO_2), zinc oxide (ZnO), tungsten oxide (WO_3), cadmium sulfide (CdS), bismuth vanadate ($BiVO_4$), and numerous hybrid or heterostructured nanocomposites have been extensively investigated for pollutant degradation applications. More recently, advanced strategies including heterojunction engineering, metal/non-metal doping, defect engineering, and surface functionalization have been employed to overcome limitations such as rapid electron-hole recombination and poor visible-light response [3].

The remarkable growth of research in semiconductor photocatalysis reflects the increasing global demand for sustainable and efficient water purification technologies. Thousands of scientific publications have explored different photocatalytic materials, synthesis methods, degradation mechanisms, and practical environmental applications. However, the rapid expansion of literature makes it challenging to identify overall research trends, influential contributions, dominant subject areas, and emerging scientific directions through conventional narrative review alone [4].

Bibliometric analysis provides a systematic and quantitative approach for evaluating the development of a research field by examining publication productivity, citation impact, authorship patterns, institutional contributions, journal influence, subject classification, and keyword relationships. Unlike traditional reviews, bibliometric studies offer a

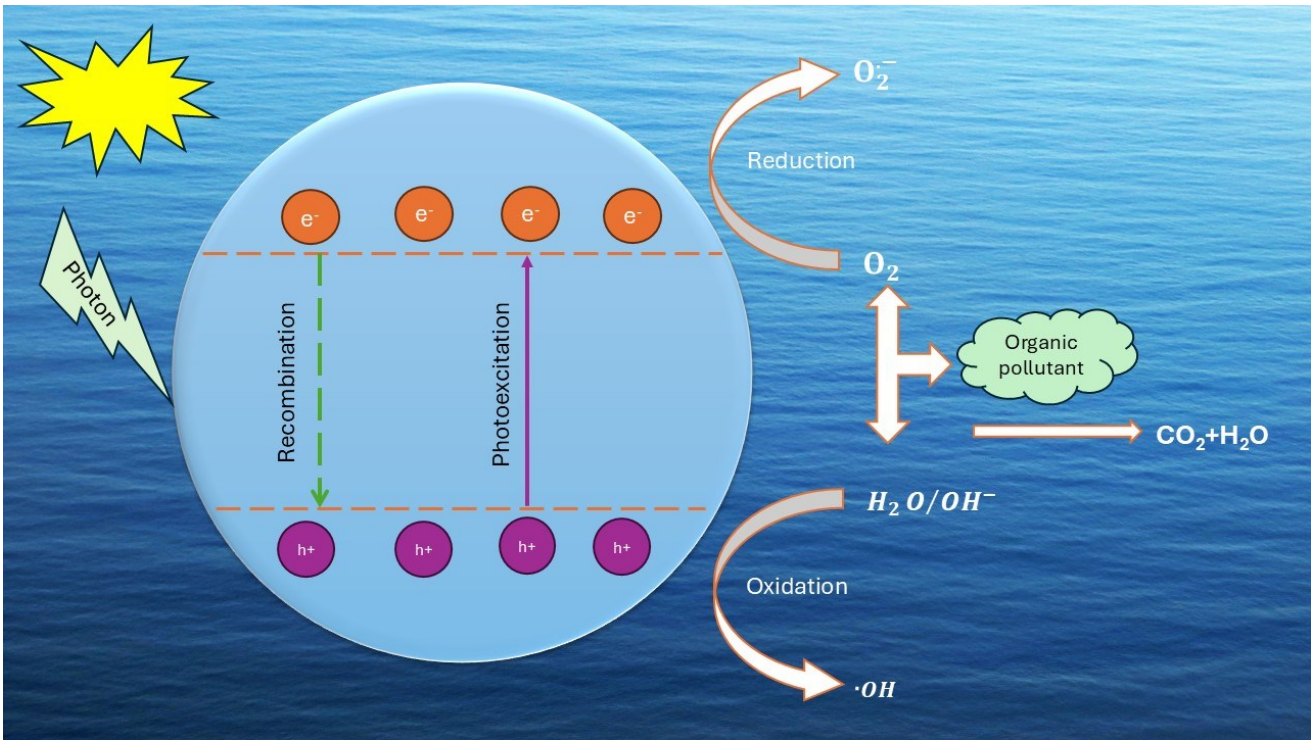


Fig.1. Photocatalytic degradation Mechanisms of organic pollutants

broader perspective on scientific evolution and research dynamics, enabling researchers to identify hotspots, collaborative opportunities, and future research priorities [5].

In this context, the present study provides a comprehensive bibliometric overview of global research on photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. By analyzing publication patterns, article classifications, citation growth, subject categories, influential journals, highly cited studies, and keyword trends, this work aims to present a clear picture of how this research domain has evolved over time and where future scientific efforts may be directed. Such an analysis is valuable not only for established researchers but also for students, policymakers, and industry stakeholders interested in sustainable environmental technologies and advanced materials for wastewater treatment.

Methodology

Data sources. The present bibliometric study was designed to systematically examine the global research landscape of photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. For this purpose, the Scopus database was selected as the primary source for literature retrieval because of its extensive coverage of peer-reviewed scientific publications across multiple disciplines, including materials science, environmental science, chemistry, nanotechnology, and engineering. Scopus is widely recognized for its comprehensive indexing, reliable citation information, and structured bibliographic records, making it a suitable platform for quantitative research evaluation [6].

Data collection. A targeted literature search strategy was developed to identify publications relevant to the selected research theme. The search process involved carefully chosen combinations of keywords associated with semiconductor nanomaterials, photocatalysis, pollutant degradation, and wastewater remediation. These terms were applied using Boolean search operators within searchable document fields such as titles, abstracts, and author keywords to ensure accurate retrieval of relevant literature while minimizing unrelated records [7].

Following the initial data extraction, the retrieved documents underwent a systematic screening process. Duplicate entries, incomplete records, and publications lacking direct relevance to the research objective were excluded to improve dataset accuracy. The refined dataset was then organized according to different bibliographic parameters, including publication year, document category, citation performance, journal source, subject classification, and frequently occurring keywords, as shown in Fig. 2.

The processed data were subsequently analyzed to evaluate publication growth over time, citation patterns, distribution of document types, major subject areas, influential publishing journals, and highly cited scientific contributions. Keyword mapping was further used to identify dominant research themes, emerging scientific directions, and evolving areas of interest within the field of semiconductor photocatalysis [8].

Although Scopus offers broad international coverage and strong citation tracking, it should be noted that literature indexed exclusively in other databases may not be represented in the present analysis. Nevertheless, the selected dataset provides a robust and representative overview of research activity in this domain.

By employing this structured bibliometric approach, the study offers valuable quantitative insight into the scientific development, research dynamics, and future opportunities in photocatalytic wastewater treatment using semiconductor nanomaterials.

Biblometric tools. This bibliometric study was conducted to evaluate global research trends in photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. Bibliographic data were collected from the Scopus database, selected for its extensive coverage of high-quality peer-reviewed scientific literature and reliable citation indexing across multi-

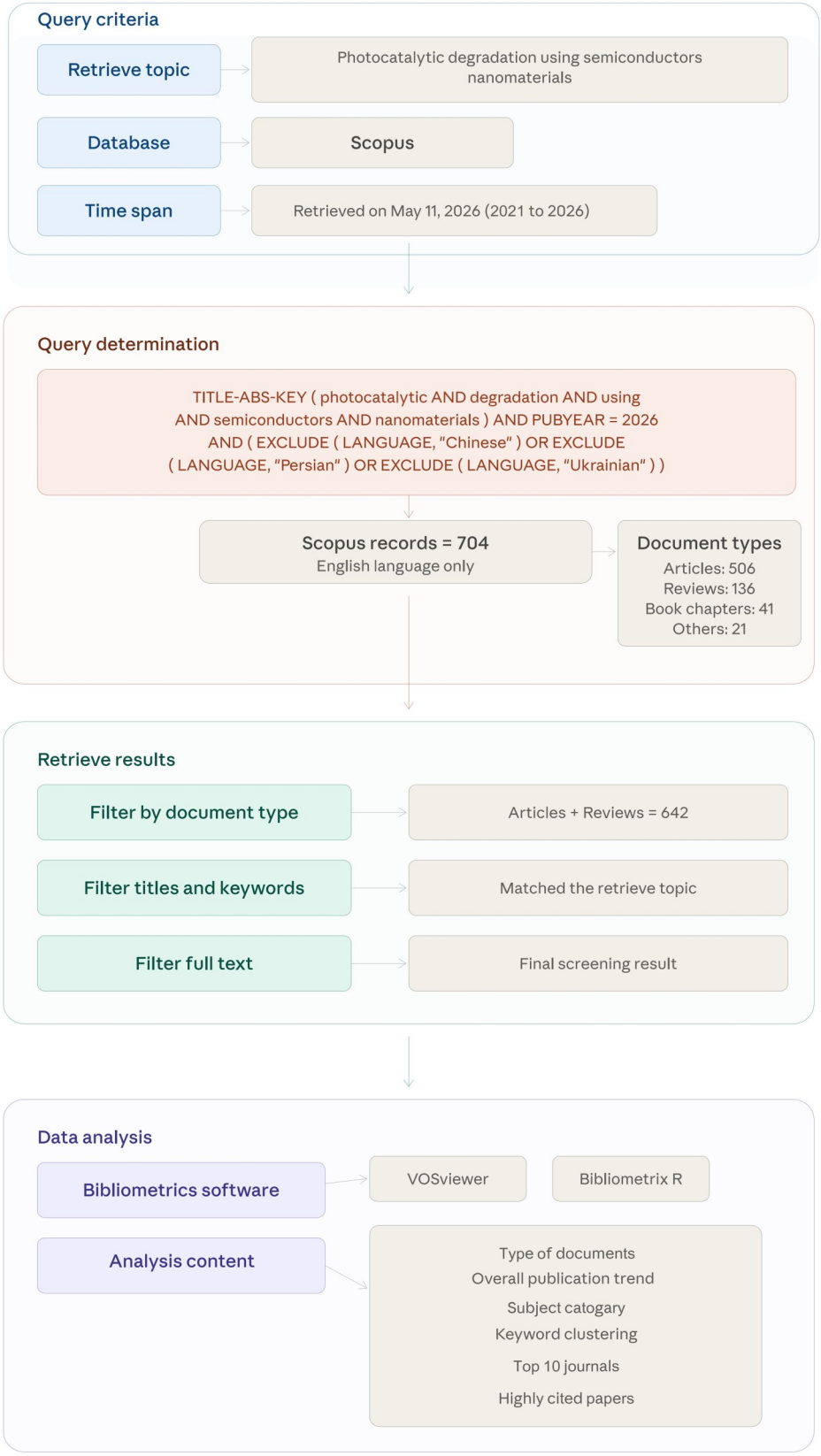


Fig. 2. Flowchart of bibliometric analysis.

disciplinary research fields [9].

A structured keyword-based search strategy was applied within the title, abstract, and keyword fields to retrieve relevant publications published between 2021 and 2026. The initial search identified 704 records. To maintain consistency and data quality, only English-language publications were included, while irrelevant and non-matching records were excluded through a systematic screening process.

The retrieved publications were categorized by document type, including articles, review papers, book chapters, and other publication formats. For the final bibliometric evaluation, only research articles and review papers were considered due to their strong scientific relevance, resulting in a refined dataset of 642 publications.

The final dataset was analyzed using VOSviewer and Bibliometrix (R package) to assess publication growth, citation trends, journal productivity, subject categories, keyword relationships, collaboration networks, and influential research contributions. This approach provides a clear quantitative understanding of the research development and emerging directions in semiconductor photocatalytic degradation.

Results and discussion

Article Type Distribution. The document type analysis reveals that research articles (Fig. 3(a)) constitute the largest proportion of publications in this field, accounting for 71.9% of the total dataset. This dominant share indicates that experimental and original scientific investigations remain the primary driving force in research on photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials.

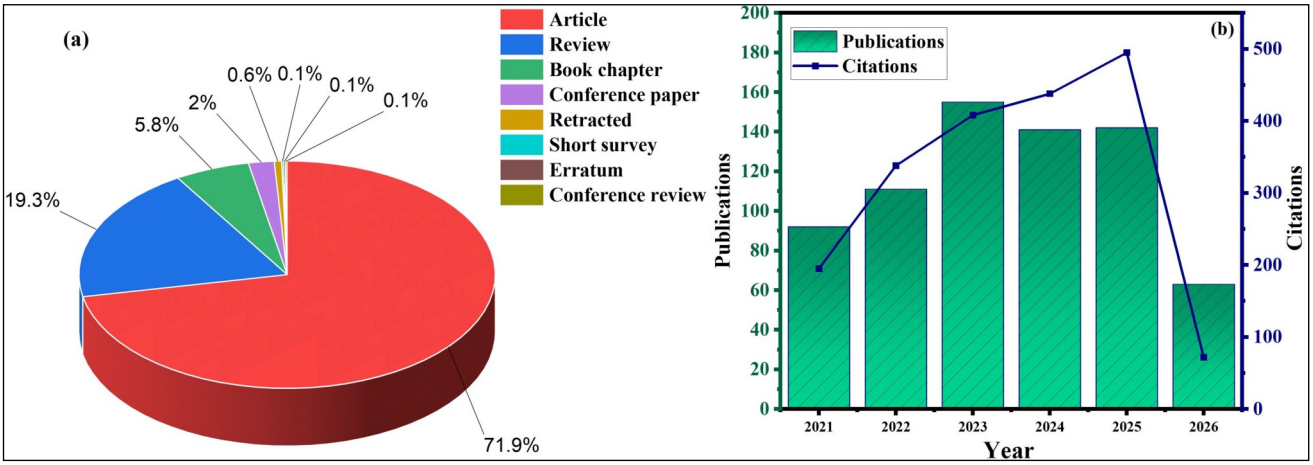


Fig. 3. Publication trends during 2021-2026 using Scopus data (a) Type of documents, and (b) number of documents with citations.

Review articles represent the second largest category with 19.3%, reflecting growing academic interest in summarizing existing knowledge, identifying research gaps, and highlighting future opportunities. Book chapters (5.8%) and conference papers (2.0%) contribute comparatively smaller proportions, suggesting moderate dissemination through academic books and scientific meetings. Other document categories, including retracted papers, short surveys, errata, and conference reviews, collectively account for only a minimal fraction of the total publications. Overall, the distribution demonstrates that this research area is strongly supported by peer-reviewed original research, with review literature also playing an important role in shaping scientific understanding.

Trends of publications. The annual publication and citation analysis demonstrates a strong and consistent growth (Fig. 3(b)) in research activity related to photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials during the study period. The number of publications increased steadily from 2021 to 2023, indicating growing scientific interest and expanding research efforts in this area. The publication output reached its highest level in 2023, reflecting intensified global attention toward semiconductor-based photocatalytic technologies for environmental remediation.

Citation performance also showed a clear upward trend from 2021 to 2025, suggesting that the published studies gained increasing academic recognition and influence over time. The highest citation count observed in 2025 highlights the strong impact and relevance of research contributions in this field. This continuous rise in citations demonstrates the increasing importance of semiconductor nanomaterials in addressing wastewater treatment and environmental sustainability challenges.

A noticeable decline in both publication and citation counts appears in 2026; however, this reduction should be interpreted cautiously, as the data collection was performed during an incomplete publication year. Therefore, the lower values for 2026 do not necessarily indicate a decrease in research interest but rather reflect partial annual data availability.

Overall, the observed publication and citation patterns confirm the rapid expansion, growing scientific impact, and sustained global research momentum in the field of semiconductor nanomaterial-based photocatalytic degradation.

Subject Category Distribution. The subject category analysis highlights the strongly multidisciplinary nature of research on photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials (Fig. 4(a)). Among all research domains, Environmental Science represents the most dominant field, contributing the highest number of publications. This strong presence reflects the primary application of semiconductor photocatalysis in addressing environmental challenges, particularly wastewater purification and pollutant remediation.

The second most significant contribution originates from Agricultural and Biological Sciences, indicating growing interest in the application of photocatalytic technologies for agricultural wastewater management, biological contaminant treatment, and sustainable environmental practices. Chemical Engineering, Energy, Chemistry, and Engineering also show substantial research activity, emphasizing the technological and scientific importance of semiconductor nanomaterials in catalyst design, reaction engineering, energy-efficient treatment systems, and chemical transformation processes.

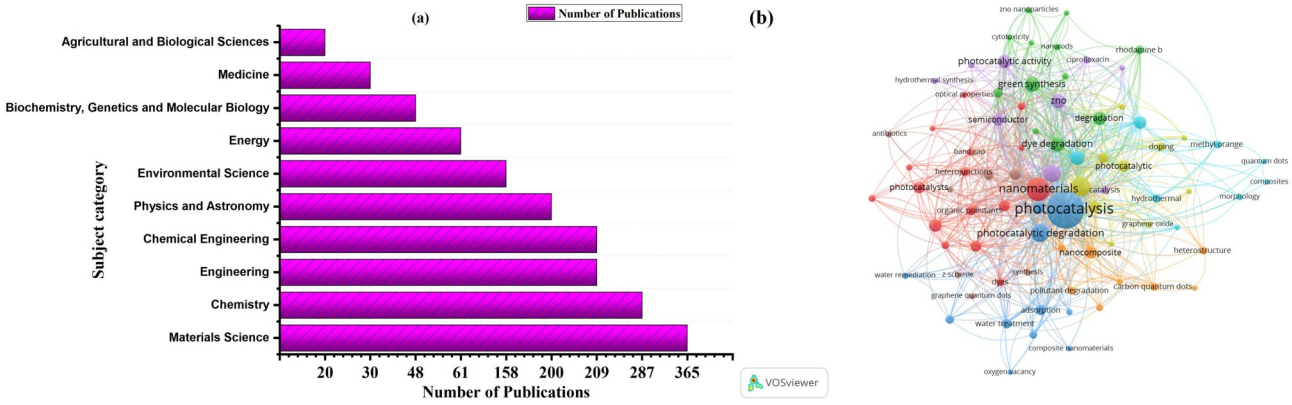


Fig. 4. (a) Most relevant subject area, and (b) Author's keywords co-occurrence during 2021-2026 (Scopus data).

Materials Science contributes a moderate but important share, reflecting ongoing efforts in the synthesis, structural optimization, and performance enhancement of advanced semiconductor photocatalysts. Smaller yet meaningful contributions are observed from Earth and Planetary Sciences, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, and Medicine, demonstrating the broader scientific relevance of photocatalytic materials beyond conventional environmental applications.

Overall, the distribution confirms that photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials is a highly interdisciplinary research field, integrating environmental protection, materials innovation, chemical sciences, and engineering solutions to develop sustainable approaches for pollution control and water treatment.

Keyword Analysis

The keyword co-occurrence network (Fig. 4(b)) provides insight into the major research themes and conceptual relationships [10] within the field of photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. The most dominant keywords, including photocatalysis, nanomaterials, and photocatalytic degradation, occupy central positions in the network, reflecting their fundamental importance in this research area. The analysis also reveals several interconnected thematic clusters representing distinct research directions, such as pollutant degradation and water treatment, semiconductor material engineering, green synthesis approaches, and advanced nanocomposite development. Common terms such as dye degradation, heterojunction, ZnO, quantum dots, graphene oxide, and water treatment further demonstrate a strong focus on material optimization and environmental remediation applications. Overall, the clustering pattern confirms the multidisciplinary and rapidly evolving nature of this research field.

Leading Journals

The journal productivity analysis (Table 1) identifies the leading publication sources contributing to research on photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. Ceramics International emerges as the most productive journal in terms of publication count, while Chemosphere demonstrates the highest citation impact, indicating strong scientific influence in the field. Journals such as Journal of Environmental Chemical Engineering, RSC Advances, and Journal of Alloys and Compounds also show significant contributions, reflecting the interdisciplinary nature of this research area spanning materials science, chemistry, and environmental engineering. Overall, the presence of high-impact journals confirms the growing academic importance and global research interest in semiconductor-based photocatalytic technologies.

Table 1

Top 10 most productive journals (Data are obtained from Scopus)

Journal	Total publications	Impact Factor	h-Index	Total citations	Average citations per paper	Initial year in the dataset
Ceramics International	24	5.6	11	428	17.83	2021
Journal of Environmental Chemical Engineering	21	7.2	13	661	31.48	2021
Chemosphere	17	.	15	1063	62.53	2021
Journal of Alloys and Compounds	14	6.3	8	225	16.07	2021
Environmental Science and Pollution Research	14	..	10	396	28.29	2021
RSC Advances	12	4.6	10	350	29.17	2021
Materials Chemistry and Physics	11	4.7	7	161	14.64	2022
Journal of Materials Science: Materials in Electronics	10	2.8	5	191	19.10	2021
Materials	10	3.2	6	165	16.50	2021
Inorganic Chemistry Communications	10	5.4	7	409	40.90	2023

Most cited articles. The analysis of highly cited publications (Table 2) highlights the most influential studies shaping research in photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. The top -cited papers primarily focus on organic pollutant degradation, TiO_2 nanostructures, adsorption-assisted photocatalysis, advanced nanocomposite materials, and green synthesis approaches. Review articles and innovative experimental studies both demonstrate strong citation impact, reflecting their importance in guiding scientific progress. The presence of publications in well-established journals such as Chemosphere, Chemical Engineering Journal, Materials Today Chemistry, and Journal of Hazardous Materials further emphasizes the high research quality and global significance of this field.

Table 2

Top 10 highly cited papers in the field of photocatalytic degradation using semiconductors nanomaterials

No.	Title	Author	Journal	Cited by	Year
1	Trends in photocatalytic degradation of organic dye pollutants using nanoparticles: A review	Lanjwani M.F.	Inorganic Chemistry Communications	331	2024
2	Hydrothermal synthesis of TiO2 nanorods: formation chemistry, growth mechanism, and tailoring of surface properties for photocatalytic activities	Gupta T.	Materials Today Chemistry	267	2021
3	Photocatalysis vs adsorption by metal oxide nanoparticles	Qumar U.	Journal of Materials Science and Technology	237	2022
4	Degradation of toxic agrochemicals and pharmaceutical pollutants: Effective and alternative approaches toward photocatalysis	Saravanan A.	Environmental Pollution	203	2022
5	Bismuth-based nanostructured photocatalysts for the remediation of antibiotics and organic dyes	Oladipo A.A.	Beilstein Journal of Nanotechnology	195	2023
6	Novel hierarchical carbon quantum dots-decorated BiOCl nanosheet/carbonized eggshell membrane composites for improved removal of organic contaminants from water via synergistic adsorption and photocatalysis	Zhou Q.	Chemical Engineering Journal	195	2021
7	Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review	Almaie S.	Chemosphere	180	2022
8	Advances in transition metal dichalcogenide-based two-dimensional nanomaterials	Monga D.	Materials Today Chemistry	158	2021
9	Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Brassica oleracea var. botrytis leaf extract: Photocatalytic, antimicrobial and larvicidal activity	Manojkumar U.	Chemosphere	155	2023
10	Multifunctional ZnO nanoparticles bio-fabricated from Canna indica L. flowers for seed germination, adsorption, and photocatalytic degradation of organic dyes	Nguyen D.T.C.	Journal of Hazardous Materials	147	2021

Note: Citation data retrieved from Scopus on May 11, 2026.

Trends and future perspectives. The bibliometric findings indicate that research on photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials has experienced remarkable growth in recent years, driven by increasing global concern over water pollution and the demand for sustainable environmental remediation technologies. The steady rise in publication output and citation impact reflects strong scientific interest in developing efficient photocatalytic systems for pollutant removal. Current research trends show a clear transition from conventional single-component semiconductor materials toward more advanced architectures such as heterojunctions, nanocomposites, quantum dots, graphene-based hybrids, and defect-engineered photocatalysts, aimed at overcoming limitations such as rapid charge recombination and limited visible-light activity [11].

Keyword clustering further suggests that future investigations will increasingly focus on green synthesis approaches, multifunctional nanomaterials, adsorption-assisted photocatalysis, and visible-light-responsive semiconductor systems to improve photocatalytic efficiency and environmental compatibility. The integration of photocatalysis with emerging technologies such as energy harvesting, smart environmental monitoring, and hybrid wastewater treatment systems may also become an important research direction [12].

Despite substantial scientific progress, challenges remain in translating laboratory-scale success into practical large-scale applications. Future research should emphasize cost-effective material synthesis, catalyst stability, real wastewater testing, long-term reusability, toxicity assessment, and industrial-scale implementation. Greater interdisciplinary collaboration between materials scientists, chemists, environmental engineers, and industry stakeholders will be essential for accelerating the development of practical semiconductor photocatalytic technologies for sustainable water purification [13].Top of Form

Conclusion

This bibliometric analysis provides a comprehensive overview of global research progress in photocatalytic degradation using semiconductor nanomaterials. The findings reveal a clear and sustained increase in publication output and citation impact, reflecting the growing scientific importance of semiconductor-based photocatalytic technologies for environmental remediation. Research activity is strongly driven by original scientific investigations, with environmental science, chemistry, engineering, and materials science emerging as the major contributing disciplines. Keyword mapping further highlights important research directions, including pollutant degradation, water treatment, heterojunction engineering, green synthesis, and advanced nanocomposite development. The identification of leading journals and highly cited publications demonstrates the strong academic influence and multidisciplinary expansion of this field. Overall, the study confirms that semiconductor nanomaterial-based photocatalysis remains a rapidly evolving and promising research area with significant potential for sustainable wastewater treatment and future environmental applications.

References:

1. Ardeshir, H., Hoseinzadeh, M., Limooei, M. B., & Hosseini, S. (2024). A scientometrics study and its practical implications for fused deposition modeling. *Alexandria Engineering Journal*, *99*, 217–231. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.009

2. Ashu Abey, S., Reis, N. M., Emanuelsson, E. A. C., & Expósito, A. J. (2025). Harnessing visible light: Advanced photocatalytic strategies for sustainable environmental reactions. *Chemical Engineering Journal*, *519*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164951

3. Davarazar, M., Kamali, M., & Lopes, I. (2021). Engineered nanomaterials for (waste)water treatment - A scientometric assessment and sustainability aspects. *NanoImpact*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100316

4. Demarema, S., Nasr, M., Ookawara, S., & Abdelhaleem, A. (2024). New insights into green synthesis of metal oxide based photocatalysts for photodegradation of organic pollutants: A bibliometric analysis and techno-economic evaluation. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 463). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142679

5. Jabbar, Z. H., & Esmail Ebrahim, S. (2022). Recent advances in nano-semiconductors photocatalysis for degrading organic contaminants and microbial disinfection in wastewater: A comprehensive review. In *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* (Vol. 17). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100666

6. Liu, X., Yuan, J., Feng, Y., Zhang, Z., Tang, L., & Chen, H. (2024). Knowledge graph and development hotspots of biochar as an emerging aquatic antibiotic remediator: A scientometric exploration based on VOSviewer and CiteSpace. *Journal of Environmental Management*, *360*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121165

7. Mohammed, A. M., Aziz, F., Mohtar, S. S., Mhamad, S. A., Ahmadu, B., Nasir, M. U., Muhammad, K. Y., & Aziz, M. (2023). A review of research trends on the usage of photocatalysis for wastewater treatment: bibliometric analysis. *Sustainable Water Resources Management*, *9*(3). https://doi.org/10.1007/s40899-023-00868-5

8. Nan, H., Wang, L., Luo, D., Zhang, Y., Liu, G., & Wang, C. (2023). A bibliometric analysis of biochar application in wastewater treatment from 2000 to 2021. In *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 20, Number 12, pp. 13957–13974). Institute for Ionics. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05030-4

9. Ren, H., Labidi, A., Miao, Z., Chang, T., Padervand, M., Lichtfouse, E., & Wang, C. (2025). Dual S-scheme heterojunction nanocomposite-driven charge transport for photocatalytic green energy production and environmental implementations—where to go? In *Advanced Composites and Hybrid Materials* (Vol. 8, Number 6). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/s42114-025-01470-3

10. Sillanpää, M., Ncibi, M. C., & Matilainen, A. (2018). Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 208, pp. 56–76). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.009

11. Swamy, K. R., Shyamala, G., Gurugubelli, T. R., Ravindran, G., & Bathula, B. (2026). Recent advancements of wastewater treatment by photocatalysis: A comprehensive review. In *iScience* (Vol. 29, Number 6). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.116088

12. Wen, G., Wu, H., Guo, X., Gao, Y., Zhang, C., & Zhang, W. (2024). Global research trends in pharmaceutical wastewater from 1990 to 2023 using bibliometric analysis. *Desalination and Water Treatment*, *318*. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100386

13. Zhao, Y., Linghu, X., Shu, Y., Zhang, J., Chen, Z., Wu, Y., Shan, D., & Wang, B. (2022). Classification and catalytic mechanisms of heterojunction photocatalysts and the application of titanium dioxide (TiO2)-based heterojunctions in environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3). https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108077



Мухтар Фаисал – профессор кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD, профессор
E-mail: fmukhtar86@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8431-5242

Mukhtar Faisal – Professor of Department “Metrology, standardization and certification”, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD, Professor
E-mail: fmukhtar86@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8431-5242

Muxtar Faisal – “Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlashtirish” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, PhD, Professor
E-mail: fmukhtar86@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8431-5242



Джумаев Одил Абдужалилович – профессор кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: jumaev5216@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5657-8176

Odil Abdujalilovich Jumaev – Professor of the Department of Metrology, Standardization and Certification, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: jumaev5216@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5657-8176

Jumayev Odil Abdujalilovich – «Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlashtirish» kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, professor
E-mail: jumaev5216@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5657-8176



Исмоилов Мухриддин Тулкин угли – доцент кафедры “Метрология, стандартизация и сертификация”, Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
E-mail: imuxriddint@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6469-0085

Mukhriddin Tulkin ugli Ismoilov – Associate Professor of the Department of Metrology, Standardization and Certification, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: imuxriddint@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6469-0085

Ismoilov Muxriddin Tulkin o‘g‘li – “Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlashtirish” kafedrasi dotsenti, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: imuxriddint@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6469-0085



Рахимов Анваржон Комилович – старший преподаватель кафедры “Метрология, стандартизация и сертификация”, Навоийский государственный горно-технологический университет
E-mail: anvarjon.komilovich@gmail.com
ORCID: 0009-0004-6290-4977

Anvarjon Komilovich Rakhimov – Senior Lecturer of the Department of Metrology, Standardization and Certification, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: anvarjon.komilovich@gmail.com
ORCID: 0009-0004-6290-4977

Rahimov Anvarjon Komilovich – “Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlashtirish” kafedrasi katta o‘qituvchisi, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
E-mail: anvarjon.komilovich@gmail.com
ORCID: 0009-0004-6290-4977

UDC 669.162.275.2 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.13

PHASE AND ELEMENTAL CHARACTERIZATION OF HIGH-CHROMIUM STEEL SLAG FOR INDUSTRIAL UTILIZATION

B.T. Mardonov, M.Kh. Sayfidinova

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *The Navoi Machine-Building Plant produces 70–90 tons of high-chromium 300X steel per month. Of this amount, 15–25% is converted into slag, generating 10.5–22.5 tons of waste per month (126–270 tons annually), for which no defined end use currently exists. This study aims to characterize the phase composition and elemental distribution of the slag and to establish potential directions for its industrial utilization. Slag samples collected following routine production campaigns were analyzed using scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) and X-ray diffraction (XRD). SEM-EDS revealed a heterogeneous, three-component microstructure comprising a metallic–carbide phase enriched in Fe (41.68 wt%) and Cr (27.81 wt%), an oxide–silicate matrix containing O, Si, Mn, and Fe, and a carbonaceous phase containing up to 53.38 wt% C. XRD identified graphite, cristobalite (SiO_2), a body-centred cubic Fe–Cr solid solution, and spinel-/eskolaite-type (Fe, Cr, Mn) oxides. A broad amorphous halo further indicated a substantial glassy silicate component. This phase assemblage is inherited from the parent alloy: excess carbon precipitates as free graphite, while oxidisable elements enter the slag as oxides and silicates. Chromium is concentrated primarily in the metallic fraction, with only 0.47 wt% present in the silicate matrix. Based on these findings, a utilization scheme is proposed: magnetic separation of the Fe–Cr fraction for return to the furnace charge; use of the graphite-rich fraction as a carburizer; and application of the silicate fraction in construction materials, abrasives, and wear-resistant coatings. Chromium leaching should be controlled before the material is used in civil applications. These data provide the first detailed characterization of 300X steel slag.*

Key words: *steel slag; high-chromium steel; chromium carbides; free graphite; cristobalite; spinel oxides; X-ray diffraction analysis; energy-dispersive spectroscopy; phase composition; magnetic separation; waste recycling; wear-resistant coatings.*

YUQORI XROMLI PO'LAT SHLAGINING FAZAVIY VA ELEMENT TARKIBI TAHLILI VA SANOATDA QAYTA ISHLASH YO'LLARI

B.T. Mardonov, M.X. Sayfidinova

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O‘zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Navoiy mashinasozlik zavodi har oyda 70–90 t yuqori xromli 300X po'latini ishlab chiqaradi, uning 15–25 %i shlakka aylanadi va natijada har oyda 10,5–22,5 t (yiliga 126–270 t) chiqindi hosil bo'ladi, hozirda undan foydalanish yo'nalishi belgilanmagan. Ushbu tadqiqot mazkur shlakning fazaviy tarkibi va elementlar taqsimotini tavsiflash hamda uni sanoatda qayta ishlash yo'nalishlarini asoslashga qaratilgan. Muntazam ishlab chiqarish jarayonlaridan keyin olingan shlak namunalari energiya dispersiv rentgen spektroskopiyasi bilan birgalikdagi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM-EDS) va rentgen fazaviy tahlil (RFT) usullarida tadqiq qilindi. SEM-EDS tahlili geterogen uch komponentli mikrostrukturani aniqladi: Fe (41,68 mas.%) va Cr (27,81 mas.%) bilan boyigan metall-karbid fazasi, O, Si, Mn va Fe saqlovchi oksid-silikat matritsa hamda tarkibida 53,38 mas.% gacha C bo'lgan uglerodli faza. RFT natijasida grafit, kristobalit SiO_2, hajmiy markazlashgan kubik (HMK) Fe–Cr qattiq eritmasi va shpinel/eskolait tipidagi (Fe, Cr, Mn) oksidlari aniqlandi, keng amorf galo esa sezilarli miqdordagi shishasimon silikat tashkil etuvchining mavjudligini ko'rsatdi. Ushbu fazaviy tarkib dastlabki qotishmadan meros bo'lib o'tgan: unda ortiqcha uglerod erkin grafit ko'rinishida ajralib chiqadi, oksidlanuvchi elementlar esa shlakka oksid va silikatlar shaklida o'tadi. Xrom asosan metall fraksiyada to'plangan, silikat matritsadagi miqdori esa atigi 0,47 mas.% ni tashkil etadi. Olingan natijalar asosida foydalanish sxemasi taklif etiladi: Fe–Cr fraksiyasini shixtaga qaytarish uchun magnit separatsiya, grafitga boy fraksiyadan karburizator sifatida foydalanish hamda silikat fraksiyasini qurilish materiallari, abrazivlar va eyilishga chidamli qoplamalarda qo'llash. Fuqarolik maqsadlarida qo'llashdan oldin xromning yuvilib chiqishini nazorat qilish tavsiya etiladi. Olingan ma'lumotlar 300X po'lat shlagining birinchi batafsil tavsifini beradi.*

Kalit so‘zlar: *po'lat shlaki; yuqori xromli po'lat; xrom karbidlari; erkin grafit; kristobalit; spinel oksidlari; rentgen fazaviy tahlil; energiya dispersiv spektroskopiya; fazaviy tarkib; magnit separatsiya; chiqindilarni qayta ishlash; eyilishga chidamli qoplamalar.*

ФАЗОВЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ШЛАКА ВЫСОКО-ХРОМИСТОЙ СТАЛИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Мардонов Б.Т., Сайфидинова М.Х.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *Навоийский машиностроительный завод ежемесячно производит 70–90 тонн высокохромистой стали марки 300Х, из которых 15–25% переходит в шлак. Таким образом, ежемесячно образуется 10,5–22,5 тонны отходов (126–270 тонн в год), для которых в настоящее время не определено направление использования. Цель исследования — определить фазовый состав и распределение элементов в шлаке, а также обосновать направления его промышленной переработки. Пробы шлака, отобранные после плановых производственных кампаний, исследованы методами сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС) и рентгенофазового анализа (РФА). Методом СЭМ-ЭДС установлена гетерогенная трёхкомпонентная микроструктура. Она включает металл-карбидную фазу, обогащённую Fe (41,68 мас.%) и Cr (27,81 мас.%), оксидно-силикатную матрицу, содержащую O, Si, Mn и Fe, и углеродистую фазу с содержанием C до 53,38 мас.%. Методом РФА идентифицированы графит, кристобалит SiO_2, ОЦК твёрдый раствор Fe–Cr и оксиды (Fe, Cr, Mn) типа шпинели/эсколаита. Широкое аморфное гало указывает на значительную долю стекловидной силикатной составляющей. Данный фазовый состав унаследован от исходного сплава: избыточный углерод выделяется в виде свободного графита, а окисляемые элементы переходят в шлак в виде оксидов и силикатов. Хром сосредоточен преимущественно в металлической фракции, а его содержание в силикатной матрице составляет лишь 0,47 мас.%. На основании полученных результатов предложена схема утилизации. Она включает магнитную сепарацию фракции Fe–Cr с возвратом её в шихту, использование графитсодержащей фракции в качестве науглероживателя и применение силикатной фракции в строительных материалах, абразивах и износостойких покрытиях. Перед использованием шлака в гражданском строительстве рекомендуется контроль выщелачивания хрома. Полученные данные представляют собой первую детальную характеристику шлака стали 300Х.*

Ключевые слова: *шлак сталеплавильный; сталь высокохромистая; карбиды хрома; графит свободный; кристобалит; шпинельные оксиды; рентгенофазовый анализ; энергодисперсионная спектроскопия; фазовый состав; магнитная сепарация; переработка отходов; износостойкие покрытия.*

Introduction

Metallurgical slags represent some of the largest industrial by-products by mass: approximately 100–150 kilograms of steel slag are produced for every tonne of crude steel, with tens of millions of tonnes being stockpiled globally each year [1]. Although established methods exist for the utilization of slags in civil engineering, cementitious binders, road foundations, and hydraulic structures, a significant proportion of slag continues to be disposed of in landfills, thereby occupying land and posing environmental risks [1, 2]. The mineralogical composition of steel slags—including calcium silicates, calcium aluminoferrites, wüstite-type oxides, the so-called RO phase (solid solutions of Fe, Mn, Mg oxides), and free oxides—determines both their utility as secondary resources and the limitations associated with their application. Notably, heavy metal leaching, such as that of chromium, remains a concern in this context [3, 4].

A particular category of slags is generated during the manufacturing and utilization of high-carbon, high-chromium alloys. Steel 300X (300Cr) is classified within the group of highly alloyed, wear-resistant materials comprising approximately 3 wt% carbon, with chromium serving as the primary alloying element. Such compositions are employed for hardfacing components subjected to severe abrasive wear and are analogous in nature to high-chromium white cast irons, whose service characteristics are attributed to chromium carbides and a carbide-reinforced matrix [5, 6]. An excess of carbon beyond the solubility limit in the alloy results, during solidification and cooling, in the formation of eutectic chromium carbides and free graphite, whereas the oxidizable constituents (Fe, Cr, Mn, Si) are partially transferred into the slag as oxides and silicates [5, 6].

At the Navoi Machine-Building Plant, the monthly production of steel 300X ranges from 70 to 90 tons. Of this quantity, approximately 15–25%, which equates to 10.5–22.5 tons per month (126–270 tons annually), is generated as slag. Presently, this slag is accumulated without a specified destination; however, it is reasonable to hypothesize that it may contain a recoverable fraction of Fe–Cr metallic (carbide), free carbon, and a hard silicate–oxide matrix that could be suitable for use in construction and abrasive applications. Nonetheless, there is a lack of published data on the phase composition and elemental distribution within the 300X slag, which impedes the formulation of a scientifically grounded recycling strategy. Consequently, the objectives of this study are (i) to characterize the elemental distribution in the slag utilizing scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), (ii) to identify its crystalline and amorphous phases through X-ray diffraction (XRD), and (iii) to delineate potential pathways for the environmentally and economically rational utilization of the slag as a secondary material resource.

Materials and Methods

Material and Sampling. Slag samples were collected from the slag yard of the Navoi Machine-Building Plant subsequent to routine production campaigns of steel 300X, which has a monthly output of 70–90 tons and a slag yield of 15–25%. The slag appeared grey-black, dense, with a conchoidal fracture and contained metallic-lustre inclusions. Representative samples were obtained through cone-and-quartering methodology; one portion was crushed and ground for XRD analysis, while another was mounted in epoxy, then ground and polished for SEM-EDS examination.

SEM-EDS analysis was conducted for microstructural observation and elemental analysis utilizing a scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments Ultim Max 100 mm² energy-dispersive detector (secondary electron mode). The acquisition parameters, which were consistent across all sites, included a live time of 108 seconds, a process time of 5 seconds, an incident beam elevation of 35°, an image resolution of 1024 × 704 pixels, a pixel size ranging from 0.01 to 0.04 μm, a dwell time of 10 microseconds per pixel for imaging, and 150 microseconds for elemental mapping (comprising three com-

plete frames). Quantitative data were obtained through standardless quantification methods that encompassed carbon and oxygen. Three characteristic sites were analyzed: Site 1, a bright metallic grain; Site 2, the grey oxide–silicate matrix; and Site 3, a dark carbonaceous inclusion (Figures 2 and 3). The summation of the measured compositions ranged from 99.99 to 100.00 wt%, thereby confirming the internal consistency of the quantification.

XRD analysis utilized a diffractometer with Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å) over 2Θ = 5–65°. Interplanar spacings were calculated using the Bragg equation, and phases were identified by comparing with standard reference patterns. The accuracy of the d-values was verified through back-calculating 2Θ from the Bragg equation, with deviations limited to 0.05°.

According to the journal's policy, the authors disclose that AI chatbot Qwen (Alibaba Cloud) was used only to organize the manuscript, refine language, and ensure formatting matches the journal template. All experimental data, interpretations, and conclusions were produced by the authors, who are entirely responsible for the content.

Results

Elemental distribution analyzed by SEM-EDS reveals a heterogeneous three-component microstructure in the polished sections (Figure 2). The corresponding quantitative data are presented in Table 1.

Site 1 (metallic–carbide grain) mainly comprises Fe (41.68%), Cr (27.81%), and C (28.92%), along with small amounts of Si and Ni, indicating chromium-alloyed iron with chromium carbides and carbon-rich material. Site 2 (matrix) is an oxidized zone enriched with O (34.62%), C (26.28%), Si (13.71%), Mn (11.89%), and Fe (10.82%), plus minor Al, Ca, Mg, Na, K, Ti, S, and Cr; it consists of an oxide–silicate mixture intertwined with carbonaceous material. Site 3 is primarily composed of carbon (53.38%) with O (28.17%), Si (12.04%), Mn (2.97%), and Fe (2.58%), signifying the presence of free graphite with silicate inclusions. The phase composition determined by XRD shows a broad amorphous halo at 2Θ ≈ 8–14° and five diffraction reflections (see Table 2 and Figure 1).

Table 1

Quantitative EDS results of characteristic sites in 300X steel slag, wt%

Element	Site 1	Site 2	Site 3
C	28.92	26.28	53.38
O	–	34.62	28.17
Na	–	0.15	–
Mg	–	0.15	–
Al	–	0.86	0.41
Si	0.59	13.71	12.04
S	0.05	0.08	–
K	–	0.14	–
Ca	–	0.68	0.24
Ti	–	0.14	0.04
Cr	27.81	0.47	0.17
Mn	–	11.89	2.97
Fe	41.68	10.82	2.58
Total	100.01	99.99	100.00

Table 2

XRD peak positions and phase assignment for 300X steel slag (Cu Kα)

2Θ, °	d, Å	Relative intensity	Assignment
9.39	9.409	weak	layered/hydrated silicate on amorphous halo
21.97	4.042	strong	cristobalite SiO_2 (101)
26.53	3.357	strong	graphite (002)
36.09	2.487	medium	spinel/eskolaite-type (Fe, Cr, Mn) oxides
44.69	2.026	medium	bcc Fe–Cr solid solution (110)

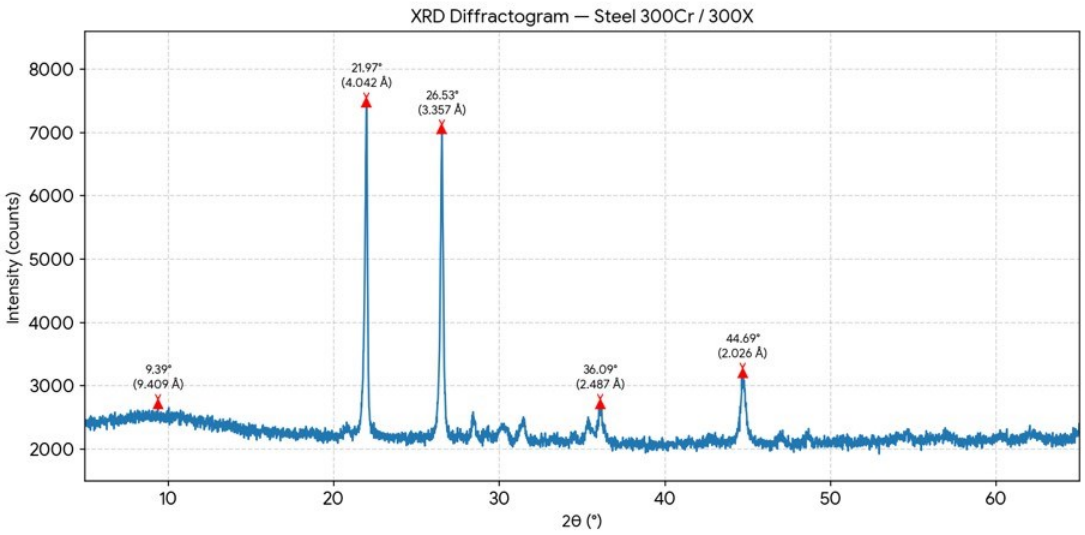


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of 300X steel slag (Cu Kα radiation).

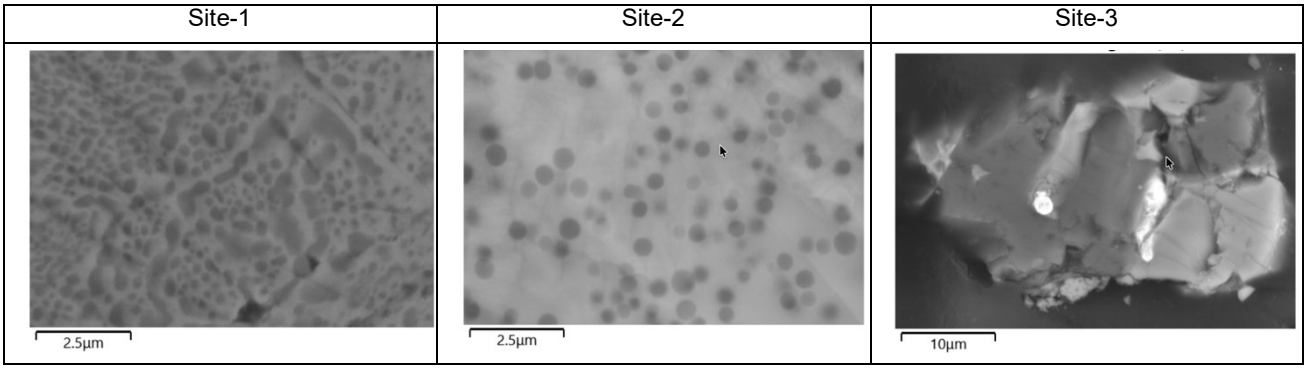


Fig. 2. SEM images of 300X steel slag with EDS analysis sites 1–3.

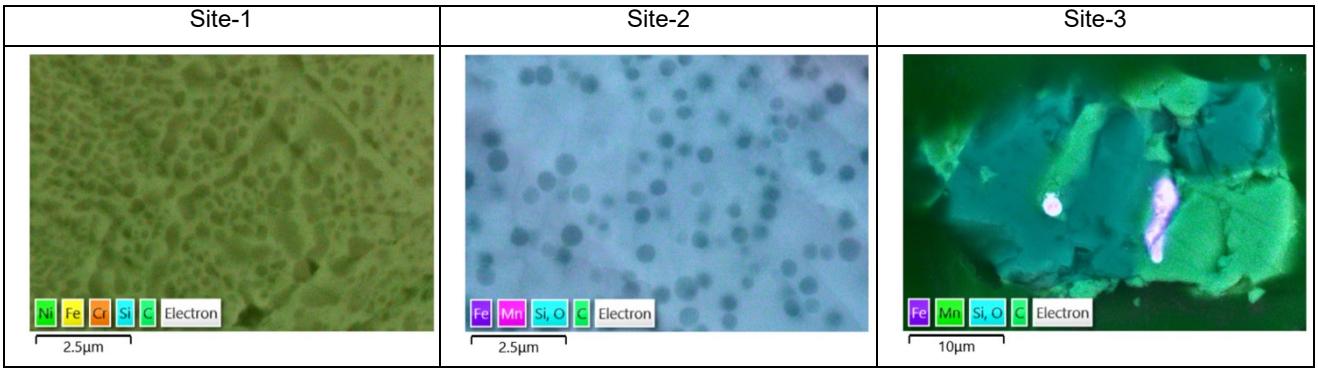


Fig. 3. EDS elemental maps of 300X steel slag (C, O, Si, Cr, Mn, Fe).

The reflection observed at 26.53° (d = 3.357 Å) is indicative of the (002) plane in graphite. The peak at 21.97° (d = 4.042 Å) pertains to the (101) plane of cristobalite, a high-temperature silica polymorph. The reflection at 44.69° (d = 2.026 Å) corresponds to the (110) plane of a body-centered cubic iron-based (Fe–Cr) solid solution. The peak at 36.09° (d = 2.487 Å) is attributable to oxide phases such as spinel (Fe, Mn)(Cr, Fe)$_2$O$_4$, eskolaite (Cr, Fe)$_2$O$_3$, or wüstite (Fe, Mn)O. Furthermore, a faint, low-angle reflection at 9.39° (d = 9.409 Å), superimposed on the amorphous halo, indicates the presence of minor layered (hydrated) silicates and a glassy silicate matrix.

Discussion

The interpretation of the phase assemblage indicates that the 300X slag constitutes a three-component system, as demonstrated by combined SEM-EDS and XRD data. These components include (i) droplets of the residual Fe–Cr–C metallic phase with chromium carbides, (ii) free graphite, and (iii) an oxidized silicate–oxide matrix containing cristobalite, spinel/eskolaite-type oxides, and a glassy phase. The metallic fraction (Site 1) reflects the composition of the parent alloy, with a chromium content of approximately 28% in the metallic grains, which is characteristic of high-chromium hardfacing alloys within the 300X family. In such alloys, wear resistance is primarily conferred by $M_7C_3/M_{23}C_6$-type chromium carbides. The EDS measurements of carbon (26–53%) likely overestimate actual values due to EDS's limited accuracy for light elements and surface contamination. Nonetheless, XRD confirmation of the graphite (002) reflection demonstrates that a significant amount of excess carbon in the alloy—around 3%, which exceeds the capacity for carbide formation during slow cooling—precipitated as free graphite. The oxide–silicate matrix forms from the oxidation of Si, Fe, Mn, and Cr during slag formation: silica appears as cristobalite, while Fe, Mn, and Cr create solid solutions resembling spinel, eskolaite, and wüstite, aligning with mineralogy typical of steel slags [3, 4]. The amorphous halo and the 9.4 Å reflection suggest a glassy silicate matrix with minor hydration products formed during outdoor storage [4].

Implications for Utilization. The identified assemblage delineates three routes for valorization. Firstly, the ferromagnetic and dense fraction comprising metallic Fe–Cr and carbides can be processed through crushing followed by dry or wet magnetic separation, resulting in an Fe–Cr concentrate suitable for reintegration into the furnace charge or for the fabrication of hardfacing electrodes and powder wires, thereby directly closing the material loop within the plant [1, 2]. Secondly, the graphite-rich fraction may be employed as a carburizer in steelmaking or as a reductant, which is especially advantageous considering the 26–53% carbon content observed in the respective zones. Thirdly, the hard silicate–oxide matrix, consisting of cristobalite, spinels, and glass, characterized by increased hardness due to dispersed carbide and oxide inclusions, serves as a prospective aggregate for heavy concrete and asphalt concrete. It also functions as an abrasive and blasting material, as well as a feedstock for wear-resistant coatings applied through re-melting, thus replicating the wear-resistant properties of the parent 300X alloy [1–3, 6]. The high hardness and brittleness inherited from the carbide-bearing parent alloy support abrasive applications but preclude structural uses that demand toughness. Environmental Constraint: Chromium-bearing slags necessitate monitoring of chromium leaching, as the oxidation of Cr(III) to the more mobile Cr(VI) constitutes the primary environmental concern associated with steel slag [4]. Although the chromium content in 300X slag is primarily retained within stable spinel/eskolaite-type oxides and the metallic fraction, it is imperative to conduct leaching tests in accordance with international protocols prior to the release of the silicate fraction for civil applications.

Limitations and avenues for future research include: the semi-quantitative nature of Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) for carbon and oxygen, the qualitative (non-Rietveld) nature of the X-ray Diffraction (XRD) phase identification, and the analysis confined to a single production campaign. Future investigations should encompass quantitative phase analysis, leaching tests, pilot-scale magnetic separation with recovery balances, and trials of the silicate fraction in concrete and wear-resistant coatings.

Conclusion

The findings of this study indicate that slag generated during the production of high-chromium 300X steel at the Navoi Machine-Building Plant, at a rate of 10.5–22.5 tonnes per month (126–270 tonnes per year), should be considered a valuable secondary raw material rather than industrial waste. Combined SEM-EDS and XRD analyses established that the slag is a heterogeneous, three-component system comprising a metallic–carbide Fe–Cr phase (41.68 wt% Fe, 27.81 wt% Cr), free graphite (up to 53.38 wt% C), and an oxide–silicate matrix enriched in O, Si, Mn, and Fe. XRD confirmed the presence of graphite (002), cristobalite SiO_2 (101), a bcc Fe–Cr solid solution (110), spinel/eskolaite-type (Fe, Cr, Mn) oxides, and a glassy silicate phase, as indicated by a broad amorphous halo.

This phase assemblage is directly inherited from the parent alloy. During slow cooling, excess carbon (approximately 3 wt%) precipitates as free graphite, while oxidizable elements (Si, Fe, Mn, and Cr) are incorporated into the slag as cristobalite, spinel-type oxides, and glass. Chromium is concentrated primarily in the metallic–carbide fraction, with only 0.47 wt% present in the oxide–silicate matrix.

On this basis, a three-route utilisation scheme is proposed: magnetic separation of the Fe–Cr fraction for return to the furnace charge or production of hardfacing materials; use of the graphite-rich fraction as a carburiser or reductant; and application of the hard silicate–oxide fraction in concrete aggregates, abrasives, and wear-resistant coatings.

Further research should encompass quantitative phase analysis, standardized leaching tests, pilot-scale magnetic separation with recovery balances, and trials assessing the use of the silicate fraction in construction and coating materials. The data obtained provide the first detailed characterization of 300X steel slag and establish a scientific foundation for its environmentally safe and economically viable recycling.

References:

1. Shi, C. (2004). Steel slag—its production, processing, characteristics, and uses. Journal of Materials in Civil Engineering, 16(3), 230–236. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)

2. Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. Waste Management, 21(3), 285–293. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00043-X

3. Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. Advances in Civil Engineering, 2011, Article 463638. https://doi.org/10.1155/2011/463638

4. Piatak, D. M., Parsons, M. B., & Seal, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. Applied Geochemistry, 57, 236–266. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009

5. Livshits, L. S., Grinberg, N. A., & Kurkumelli, E. G. (1969). Osnovy legirovaniya naplavlennogo metalla [Fundamentals of alloying of deposited metal]. Mashinostroenie. [In Russ]

6. Tabrett, C. P., Sare, I. R., & Ghomashchi, M. R. (1996). Microstructure–property relationships in high chromium white iron alloys. International Materials Reviews, 41(2), 59–82.



Мардонов Бахтиёр Тешаевич – ректор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: mbt69@mail.ru
ORCID: 0009-0007-9553-2630

Bakhtiyor Teshaevich Mardonov – Rector, Professor at the Mechanical Engineering Department, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Technical Science, Professor
E-mail: mbt69@mail.ru
ORCID: 0009-0007-9553-2630

Mardonov Baxtiyor Teshayevich – rektor, “Mashinasozlik texnologiyasi” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, Professor
E-mail: mbt69@mail.ru
ORCID: 0009-0007-9553-2630



Сайфидинова Махлиё Хушвакт кизи – докторант (PhD) кафедры «Технология машиностроения», Навоийский государственный горно-технологический университет
E-mail: sayfidinova.mk@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2355-1494

Makhliyo Khushvakt kizi Sayfidinova – PhD student at the Mechanical Engineering Department, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: sayfidinova.mk@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2355-1494

Sayfidinova Maxliyo Xushvaqt qizi – “Masinasozlik texnologiyasi” kafedrasi tayanch doktoranti (PhD), Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
E-mail: sayfidinova.mk@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2355-1494

UO‘K 621.314 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.14

YUQORI KUCHLANISHLI HAVO ELEKTR UZATISH LINIYALARIDA TOJLANISH HODISASINI MONITORING QILISHNING NAZARIY ASOSLARI

A.N. Tovboyev, I.B. Tog‘ayev

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O’zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Ushbu maqolada yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish bilan bog‘liq jarayonlarni monitoring qilish, elektr energiyasini uzatish tizimlarining ishonchliligi, energetik samaradorligi va ekspluatatsion barqarorligini ta’minlashga qaratilgan kompleks ilmiy-texnik masalalar tahlil qilinadi. Shuningdek, tojlanish hodisasini ishonchli aniqlash uchun elektr, elektromagnit, akustik, optik va meteorologik nazorat kanallarini o‘zaro integratsiyalashga asoslangan ko‘p parametrli monitoring konsepsiyasi taklif etiladi. Monitoring tizimida yuqori chastotali elektromagnit impulslar, ultratovush signallari, ultrabinafsha nurlanish intensivligi, tojlanish toki, faza kuchlanishi, aktiv quvvat isrofi va atmosfera ko‘rsatkichlarini sinxron qayd etish nazarda tutilgan. Olingan signallarni filtrlash, normallashtirish, spektral tahlil qilish va diagnostik belgilar bo’yicha tasniflash orqali tojlanishning boshlanish bosqichi, rivojlanish darajasi va energetik oqibatlarini baholash imkoniyati ko‘rsatib berildi. Nazariy tahlil natijasida tojlanish holatini faqat bitta o‘lchash parametri asosida baholash yetarli ishonchlilikni ta’minlamasligi, monitoring natijalarining aniqligini oshirish uchun turli fizik tabiatga ega diagnostik signallarni birlashtirish zarurligi aniqlangan. Taklif etilgan yondashuv yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanishdan kelib chiqadigan elektr energiyasi isroflarini operativ baholash, xavfli maydonlarni aniqlash, o‘tkazgichlarning texnik holatini bashoratlashtirish, profilaktik xizmat ko‘rsatish muddatlarini optimallashtirish hamda elektr energiyasini uzatish samaradorligini oshirish uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qilishi ilmiy asoslab berildi. Bundan tashqari, monitoring ma’lumotlarini kompleks qayta ishlash asosida tojlanish faolligining atmosfera namligi, harorat, shamol tezligi va ishchi kuchlanish bilan o‘zaro bog‘liqligini aniqlash imkoniyati asoslandi. Ushbu yondashuv real vaqt rejimida diagnostika aniqligini oshirish, avariya xavfini erta aniqlash va liniyalarning ekspluatatsion resursidan yanada samarali foydalanish imkonini beradi. Olingan natijalar elektr tarmoqlarida raqamli monitoring, prediktiv diagnostika va energiya isroflarini boshqarish tizimlarini takomillashtirishda amaliy ahamiyat kasb etadi.*

Kalit so‘zlar: *tojlanish, monitoring, tojlanish toki, tojlanish monitoring indeksi, tegishli parametrning vazn koeffitsiyenti, yuqori kuchlanish, havo elektr uzatish liniyasi, elektromagnit signal, akustik signal, ultrabinafsha nurlanish, meteorologik parametrlar, elektr energiyasi isrofi.*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Товбаев А.Н., Тогаев И.Б.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной статье анализируется комплекс научно-технических задач, связанных с мониторингом процессов коронного разряда на высоковольтных воздушных линиях электропередачи и направленных на обеспечение надежности, энергетической эффективности и эксплуатационной устойчивости систем передачи электрической энергии. Кроме того, предложена концепция многопараметрического мониторинга, основанная на интеграции электрических, электромагнитных, акустических, оптических и метеорологических каналов контроля с целью надежного выявления коронного разряда. В системе мониторинга предусматривается синхронная регистрация высокочастотных электромагнитных импульсов, ультразвуковых сигналов, интенсивности ультрафиолетового излучения, тока коронного разряда, фазного напряжения, потерь активной мощности и атмосферных параметров. Показана возможность оценки начальной стадии возникновения коронного разряда, степени его развития и энергетических последствий посредством фильтрации, нормализации, спектрального анализа и классификации полученных сигналов по диагностическим признакам. В результате теоретического анализа установлено, что оценка состояния коронного разряда только по одному измеряемому параметру не обеспечивает достаточной достоверности, вследствие чего для повышения точности результатов мониторинга необходимо объединение диагностических сигналов различной физической природы. Научно обосновано, что предложенный подход может служить теоретической основой для оперативной оценки потерь электрической энергии, вызванных коронным разрядом на высоковольтных воздушных линиях электропередачи, выявления опасных участков, прогнозирования технического состояния проводов, оптимизации сроков профилактического технического обслуживания и повышения эффективности передачи электрической энергии. Кроме того, обоснована возможность определения взаимосвязи активности коронного разряда с атмосферной влажностью, температурой, скоростью ветра и рабочим напряжением на основе комплексной обработки данных мониторинга. Предлагаемый подход позволяет повысить точность диагностики в режиме реального времени, обеспечить раннее выявление аварийно опасных состояний и более эффективно использовать эксплуатационный ресурс линий электропередачи. Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования систем цифрового мониторинга, предиктивной диагностики и управления потерями электрической энергии в электрических сетях.*

Ключевые слова: *Коронный разряд, мониторинг, ток коронного разряда, индекс мониторинга коронного разряда, весовой коэффициент соответствующего параметра, высокое напряжение, воздушная линия электропередачи, электромагнитный сигнал, акустический сигнал, ультрафиолетовое излучение, метеорологические параметры, потери электрической энергии.*

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR MONITORING CORONA DISCHARGE PROCESSES ON HIGH-VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

A.N. Tovboev, I.B. Togaev

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This article presents a comprehensive scientific and technical analysis of the problems associated with monitoring corona-discharge-related processes on high-voltage overhead transmission lines, with particular emphasis on ensuring the reliability, energy efficiency, and operational stability of electric power transmission systems. In addition, a multiparameter monitoring concept is proposed based on the integrated use of electrical, electromagnetic, acoustic, optical, and meteorological monitoring channels for the reliable detection of corona discharge. The monitoring system is designed to provide synchronized acquisition of high-frequency electromagnetic pulses, ultrasonic signals, ultraviolet radiation intensity, corona current, phase voltage, active power losses, and atmospheric parameters. The feasibility of evaluating the inception stage, development level, and energy-related consequences of corona discharge through signal filtering, normalization, spectral analysis, and classification according to diagnostic features is demonstrated. The theoretical analysis has shown that assessing the corona-discharge state on the basis of a single measured parameter does not provide sufficient reliability; therefore, diagnostic signals of different physical nature must be integrated in order to improve the accuracy of monitoring results. It is scientifically substantiated that the proposed approach can serve as a theoretical basis for the real-time assessment of electrical energy losses caused by corona discharge on high-voltage overhead transmission lines, the identification of hazardous sections, prediction of conductor technical condition, optimization of preventive maintenance intervals, and improvement of electric power transmission efficiency. Furthermore, the possibility of determining the relationship between corona-discharge activity and atmospheric humidity, temperature, wind speed, and operating voltage through comprehensive processing of monitoring data is substantiated.*

Key words: *corona discharge, monitoring, corona current, corona monitoring index, weighting coefficient of the corresponding parameter, high voltage, overhead power transmission line, electromagnetic signal, acoustic signal, ultraviolet radiation, meteorological parameters, electrical energy losses.*

Kirish

Elektr uzatish tizimlarining ishonchliligi va energetik samaradorligini oshirish uchun tojlanish jarayonini o‘z vaqtida aniqlash, uning rivojlanish darajasini baholash va elektr energiyasi isroflarini nazorat qilish muhim ahamiyatga ega. Shu sababli elektr, elektromagnit, akustik, optik va meteorologik parametrlarni kompleks qayd etishga asoslangan ko‘p parametrli monitoring tizimlarini ishlab chiqish dolzarb ilmiy-texnik masala hisoblanadi. Bunday monitoring tojlanishning boshlanish holatini aniqlash, xavfli liniya maydonlarni belgilash, o‘tkazgichlarning texnik holatini bashoratlashtirish va xizmat ko‘rsatish samaradorligini oshirish imkonini beradi [1-4]. Yuqori kuchlanishli havo liniyasida tojlanish faolligi monitoring parametrlarining ($U(t)$ -liniya kuchlanishining, $I(t)$ -faza toklarning, $P_{\Sigma}(t)$ -umumiy quvvat yo‘qotishi, $E_{em}(t)$-elektromagnit nurlanish intensivligi, $A_{ak}(t)$ -akustik signallarning intensivligi, $K_{atm}(t)$-atmosfera holatini hisobga oluvchi koeffitsiyent) kabilarning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi orqali baholanib, u quyidagi vektor 1-ifoda orqali aniqlanadi:

$$Z(t)=\begin{bmatrix} U(t) \\ I(t) \\ P_{\Sigma}(t) \\ E_{em}(t) \\ A_{ak}(t) \\ K_{atm}(t) \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Metodlar

Monitoring jarayonini tizimli ifodalash uchun tojlanish holatini integral indeks orqali ifodalash maqsadga muvofiq hisoblanadi. Ushbu indeks ko‘p omilli baholashga asoslangan bo‘lib, u quyidagi 2-ifoda orqali aniqlanadi:

$$CI(t)=\sum_{i=1}^{n}\varpi_i\cdot\frac{Z_i(t)-Z_{i0}}{Z_{i0}} \qquad (2)$$

bu yerda:

$CI(t)$-tojlanish monitoring indeksi;

ϖ_i -tegishli parametrning vazn koeffitsiyenti;

Z_{i0} -normal ekspluatatsion holatga mos etalon qiymat.

Tadqiqot olib borilshda L– Bessopan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi uchun quyidagi meteo-statistik ishchi holat o‘lchovlarni (1-jadval) asosida qabul qilamiz.

1-jadval

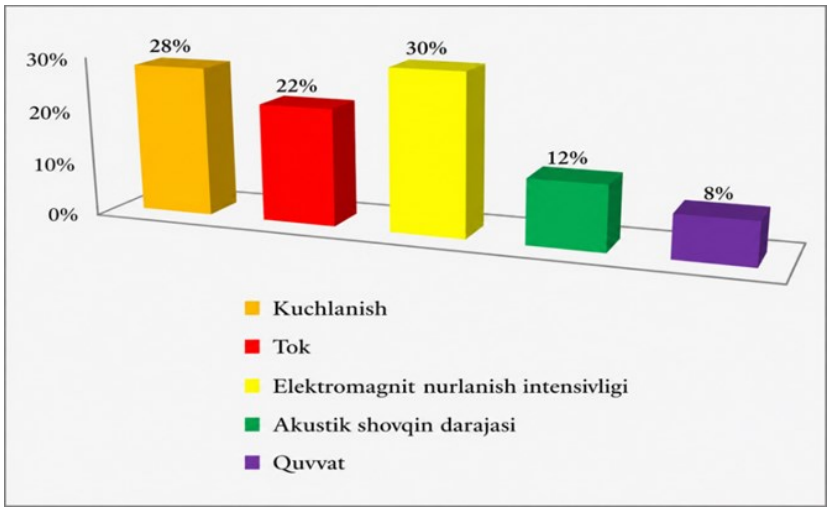
Tojlanish jarayonini baholashda qabul qilingan o‘rtacha meteo-statistik parametrlar

Parametr	Qabul qilindi
Harorat	+32 C
Atmosfera bosimi	96-97kPa
Namlik	28 %
Chang indeksi	0.6
Shamol tezligi	6 m/s

Tojlanish razryadini monitoring qilishda atmosfera koeffitsiyenti K_{atm} ni korreksiyalovchi kompleks koeffitsiyent sifatida $K_{atm}(t)$ =1.12 qiymat deb qabul qilish mumkin, chunki quruq havoda havo zichligi va namlikning pasayishi tufayli tojlanish, odatda, susayadi, biroq o‘tkazgich sirtidagi chang, ifloslanish va shamol turbulentligi o‘tkazgich atrofidagi elektr maydon taqsimotining notekisligini kuchaytirib, qisman razryadlar intensivligini qayta oshiradi [5-6].

Natijalar va ularni muhokama qilish

Zamonaviy tadqiqotlarda o‘tkazgich sirti holati tojlanish boshlanishi va intensivligiga kuchli ta’sir etuvchi omil ekani, ya’ni sirtdagi zarrachalar va notekisliklar elektr maydoni konsentratsiyasini oshirishi ko‘rsatilgan. Shovqin darajasi uchun dB va dBA birliklari qo‘llaniladi. Inson qulog‘ining sezgirligiga moslashtirilgan shovqin bahosi dBA bo‘lib, u yuqori kuchlanishli liniyalardagi tojlanish shovqinini o‘lchashda (Elektrotexnika va elektronika muhandislari instituti) standartlarida qo‘llanadi. Yuqori kuchlanishli liniyalar uchun qor va quruq sharoitda shovqin pastroq, yomon ob-havoda esa yuqoriroq bo‘lishi ma’lum. 220–330 kV diapazonida shovqin jarajasi taxminan 40–51 dBA darajalar, ayrim holatlarda esa 52–55 dBA atrofidagi qiymatlar qayd etilgan. Shu sababli $E_{em}(t)$=46 dB, $A_{ak}(t)$ =54 dBA qiymatlari tojlanish bilan bog‘liq akustik ta’sirning real monitoring diapazoni sifatida qabul qilinishi mumkin. Tojlanish razryadining asosiy tashqi ko‘rinishlaridan biri radioxalaqit va elektromagnit shovqin hisoblanadi [7-9].Tojlanish hodisasi natijasida ionlashuv va impulsli razryadlar yuzaga kelib, radiochastotali xalaqitlarni keltirib chiqaradi. Tojlanish razryadi akustik bosim tebranishlarini yuzaga keltirib, eshitiladigan shovqinni hosil qiladi, bu ayniqsa liniyalarning ekologik va sanitar-gigiyenik bahosida muhim ko‘rsatkichdir. Elektrotexnika va elektronika muhandislari institutining standart va zamonaviy adabiyotlarda eshitiladigan shovqin tojlanishning eng muhim tashqi belgilaridan biri sifatida qayd etildi. Kuchlanish tojlanish boshlanishining eng muhim omillaridan biri bo‘lsa-da, integral baholashda kuchlanish ko‘proq natijaviy parametr emas sababchi parametr vazifasini bajaradi [10-16]. Ya’ni kuchlanish ortishi tojlanish boshlanishini kuchaytiradi, lekin tojlanishning zararini amalda ko‘proq P (aktiv quvvat yo‘qotishi), E (elektromagnit nurlanish yoki elektromagnit signal intensivligi), A (akustik shovqin intensivligi) kabi chiqish ko‘rsatkichlarini ifodalaydi. Tojlanish monitoringida liniya kuchlanishi, faza toklari, tojlanish bilan bog‘liq quvvat yo‘qotishlari, elektromagnit nurlanish intensivligi, akustik shovqin darajasi, atmosfera sharoiti ko‘rsatkichlari (harorat, havo namligi, atmosfera bosimi), o‘tkazgich sirti holati, izolyatsiya elementlarining holati kabilar asosiy parametrlari sifatida xizmat qilishi (1-rasm) asosida shakllandi.



1-rasm. Tojlanish monitoringida asosiy parametrlarning tarkibiy ulushi

1-rasmga ko‘ra, elektromagnit va kuchlanish parametrlari eng yuqori ulushga ega bo‘lib, tojlanish jarayonini aniqlashda hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi. Tok, akustik va quvvat parametrlari esa yordamchi axborot manbalari sifatida tojlanish hodisasini kompleks baholash imkonini ta’minlaydi. Tojlanish jarayonidagi monitoring ma’lumotlarini quyidagi 2-jadvalga kiritamiz.

2-jadval

Monitoring parametrlari va kirish ma’lumotlari

Nominal kuchlanish U	220 kV
Liniya uzunligi L	184 km
Havo harorati T	305 K
Atmosfera bosimi P	94 kPa
Nisbiy namlik R_h	28 %
O‘tkazgich sirtining changlanish indeksi D	0.6
Shamol tezligi v	5 m/s
Akustik monitoring signali A	54 dBA
Solishtirma tojlanish quvvati P_{toj}	3.8 kVt/km

Liniya bo‘yicha tojlanish bilan bog‘liq umumiy quvvat yo‘qotishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\Delta P_{toj,\Sigma}(t) = P_{toj}(t) \cdot L \qquad (3)$$

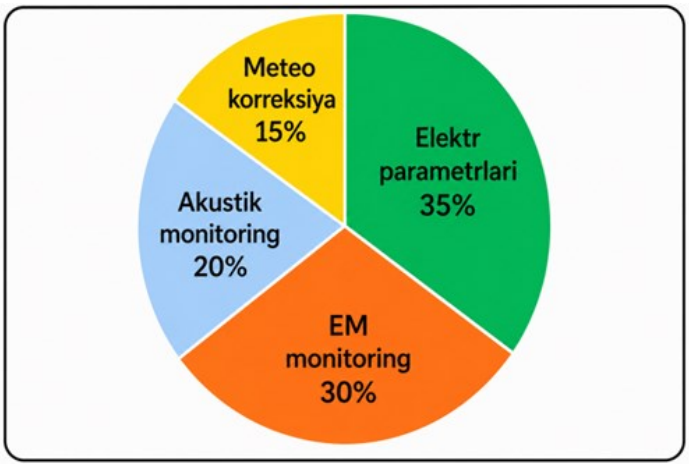
Bu yerda $\Delta P_{toj,\Sigma}(t)$ -vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi solishtirma tojlanish quvvati, kVt/km, L-liniya uzunligi, km.

Monitoring sharoitida $P_{toj}(t)$ etalon qiymatdan kelib chiqib, quyidagi ko‘p omilli korreksiya modeli orqali aniqlanadi:

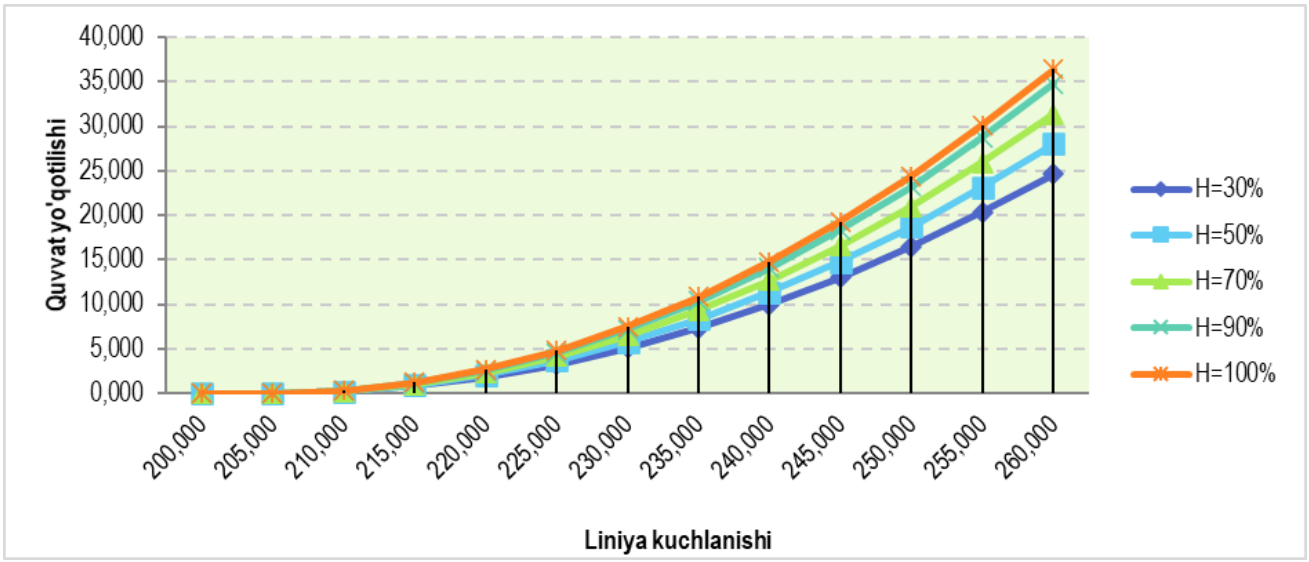
$$P_{toj}(t) = P_{toj} \cdot K_{\delta} \cdot K_{Rh} \cdot K_{ichkimonitoring} \cdot K_{shamol} \cdot K_{ak} \qquad (4)$$

L–Bessopan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida tojlanish hodisasini monitoring qilishning nazariy asosi sifatida solishtirma tojlanish quvvatiga tayanuvchi energetik model qabul qilindi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, berilgan ekspluatatsion sharoitlarda liniya bo‘yicha tojlanish bilan bog‘liq umumiy quvvat yo‘qotishi taxminan 3.7 mVt ni, yillik energiya yo‘qotishi esa 32.3 gVt·soatni tashkil etishi aniqlandi.Monitoring parametrlarini quyidagi (2-rasm) da ko’rishimiz mumkin.

Tojlanish monitoringida elektr rejim parametrlari 32 % tarkibiy ulush bilan asosiy diagnostik manba hisoblanadi. Elektromagnit monitoring 30



2-rasm. Tojlanish monitoringida axborot manbalarining tarkibiy ulushi



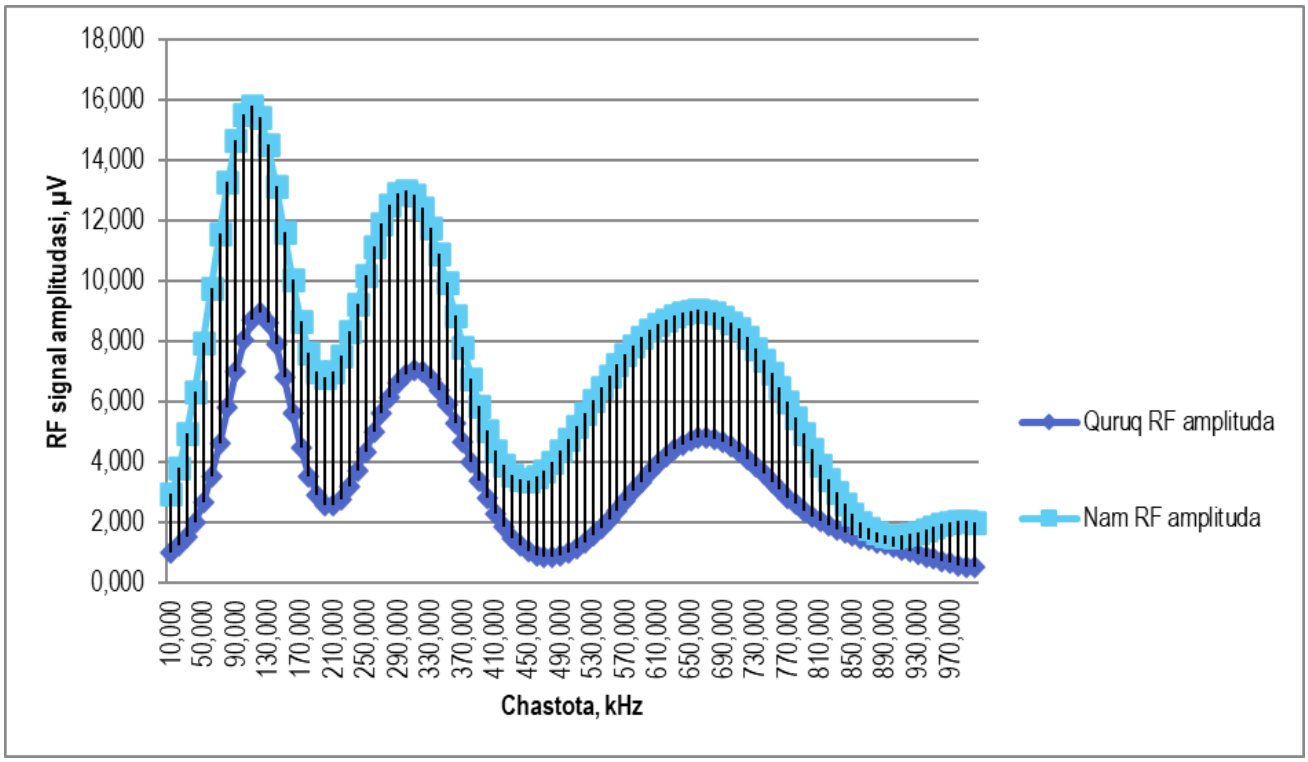
3-rasm. Kuchlanish va namlikning tojlanish yo‘qotishlari sezgirligiga bog’liqlik matritsasi

%, akustik monitoring 20 % va meteorologik korreksiya 15 % ulush bilan tojlanish holatini kompleks baholashni ta’minlaydi.Monitoring vaqtida kuchlanish, namlik kabi parametrlarning tojlanishga bog‘liqligi (3 -rasm) da tahlil qilindi.

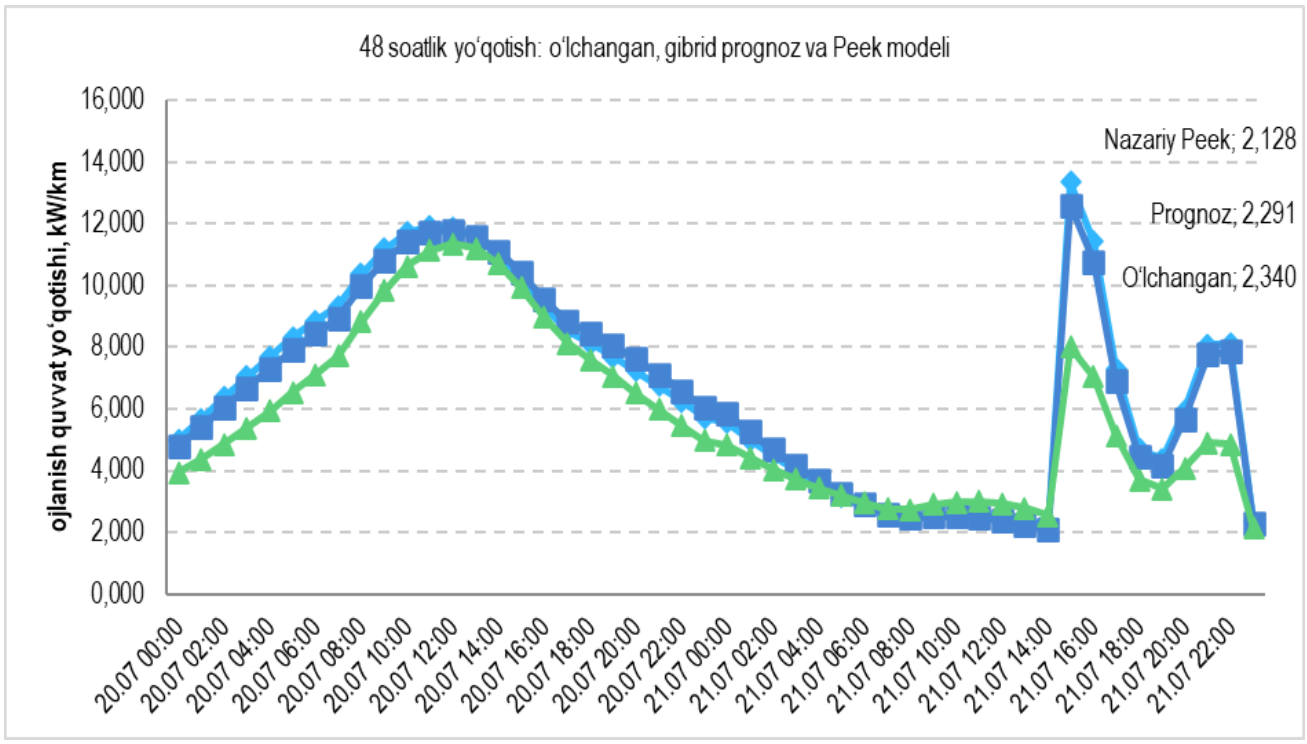
Grafikdan ko‘rinadiki, liniya kuchlanishi 210 kV dan oshgach tojlanish quvvat yo‘qotishlari keskin ortadi. Nisbiy namlik oshishi bilan yo‘qotishlar ham ko‘payib, eng yuqori qiymat H=100% holatida kuzatiladi. Tojlanish razryadi paytida hosil bo‘ladigan qisqa davomli elektromagnit impulslar radiochastota diapazonida tarqaladi. Ushbu signallarning amplitudasi, chastotasi, impulslar soni va spektral zichligi orqali tojlanishning mavjudligi hamda rivojlanish darajasi aniqlanadi.Shu bilan birga quruq va nam sharoitda monitoring o’tkazish ham bevosita quyidagi (4-rasm) dagi grafiklarni olish imkonini beradi.

Grafik tojlanish razryadi hosil qiladigan radiochastotali signal amplitudasining chastota bo‘yicha o‘zgarishini ifodalaydi. Nam sharoitda signal amplitudasi quruq sharoitga nisbatan yuqori bo‘lib, bu o‘tkazgich sirtidagi namlik ta’sirida tojlanish intensivligining kuchayishini ko‘rsatadi. Tojlanish hodisasini monitoring qilishda ilmiy-analitik boshqaruv panelidan foydalanib, ma’lum bir vaqt oralig’ini qabul qilamiz. 2026-yilning 20 –21-iyul kunlari davomida 48 soat oralig‘ida tojlanish bilan bog‘liq quvvat yo‘qotishlarining o‘lchangan qiymatlari, gibrid bashoratlashtirish natijalari hamda nazariy Peek modeli bo‘yicha hisoblangan qiymatlarini o‘zaro taqqoslandi. Grafikdan ko‘rinishicha, gibrid bashoratlashtirish egri chizig‘i o‘lchangan ma’lumotlarning umumiy dinamikasi va keskin o‘zgarishlarini yuqori darajada takrorlaydi. Ayniqsa, 20-iyulning kunduzgi soatlaridagi bosqichma-bosqich o‘sish hamda 21-iyul soat 15:00 atrofida kuzatilgan keskin maksimum bashoratlashtirish modeli tomonidan yetarlicha aniq aks ettirilgan (5-rasm).

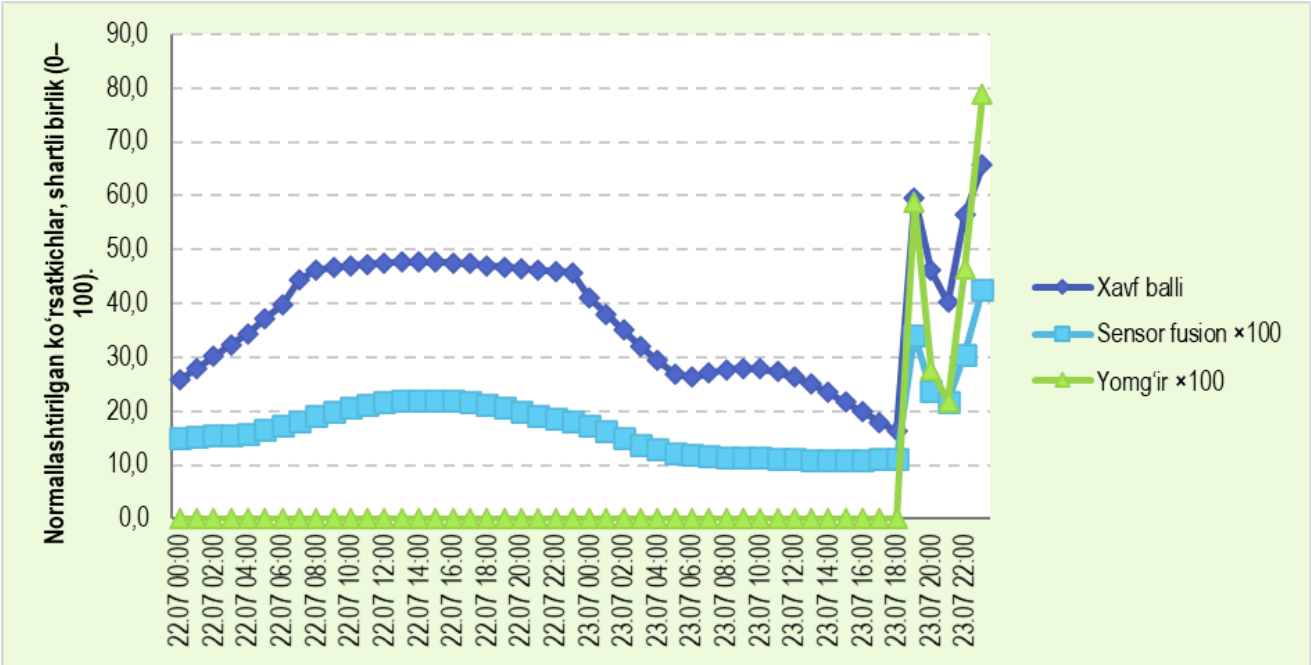
Grafikda 48 soat davomida o‘lchangan tojlanish yo‘qotishlari gibrid prognoz va Peek modeli natijalari bilan taqqoslangan. Gibrid prognoz o‘lchangan qiymatlarga yaqin bo‘lib, keskin o‘zgarishlarni Peek modeliga nisbatan aniqroq aks ettirgan. Tojlanish xavfi balli, sensorlardan integrallashgan monitoring ko‘rsatkichi va yomg‘ir intensivligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi va yomg‘ir boshlanishi bilan sensor fusion indeksi hamda xavf ballining keskin ortishi namlik va yog‘ingarchilik ta’sirida o‘tkazgich sirtidagi elektr maydonning mahalliy notekisligi kuchayib, tojlanish jarayoni intensivlashishini ko‘rsatishi quyidagi (6-rasm) da ko’rsatilgan.



4-rasm. Quruq va nam sharoitlarda tojlanish razryadi radio to'lqinli chastota signal amplitudasining chastotaga bog'liqligi

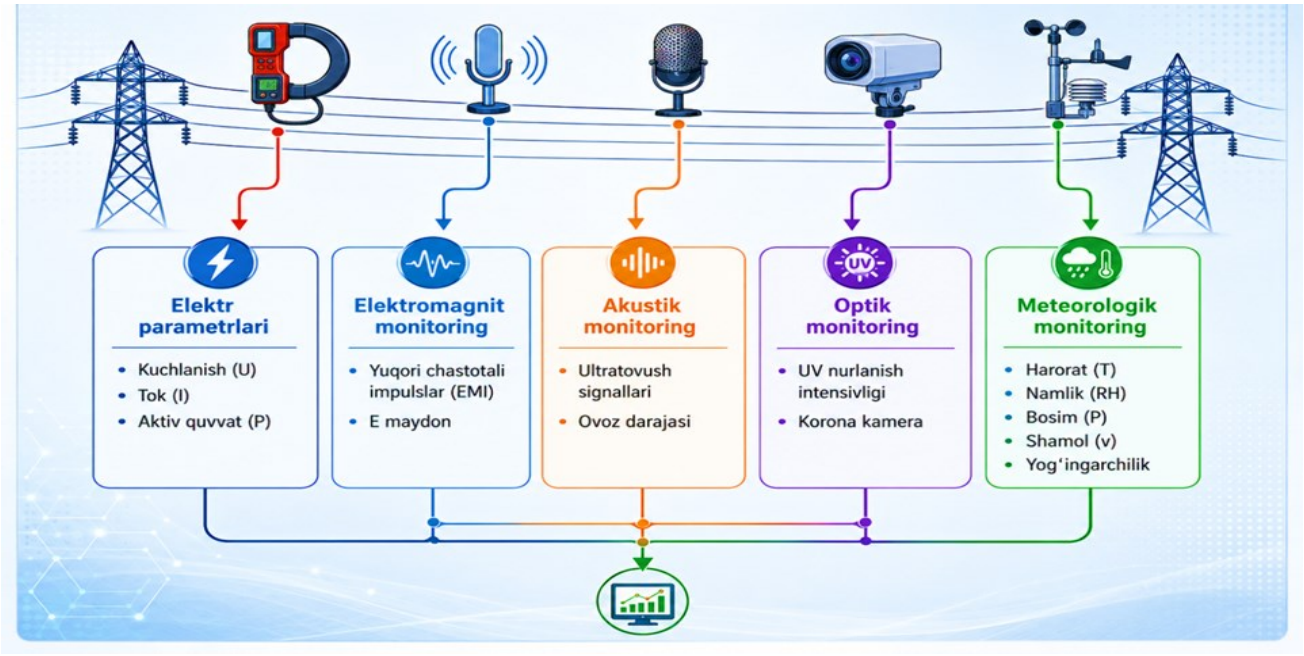


5-rasm. 48 soat davomida tojlanish yo'qotishlarining o'lchangan qiymatlari, gibrid prognoz natijalari va Peek modeli bo'yicha nazariy hisoblarning taqqoslanishi



6-rasm. Tojlanish xavfi balli, sensor fusion indeksi va yomg‘ir ko‘rsatkichining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi

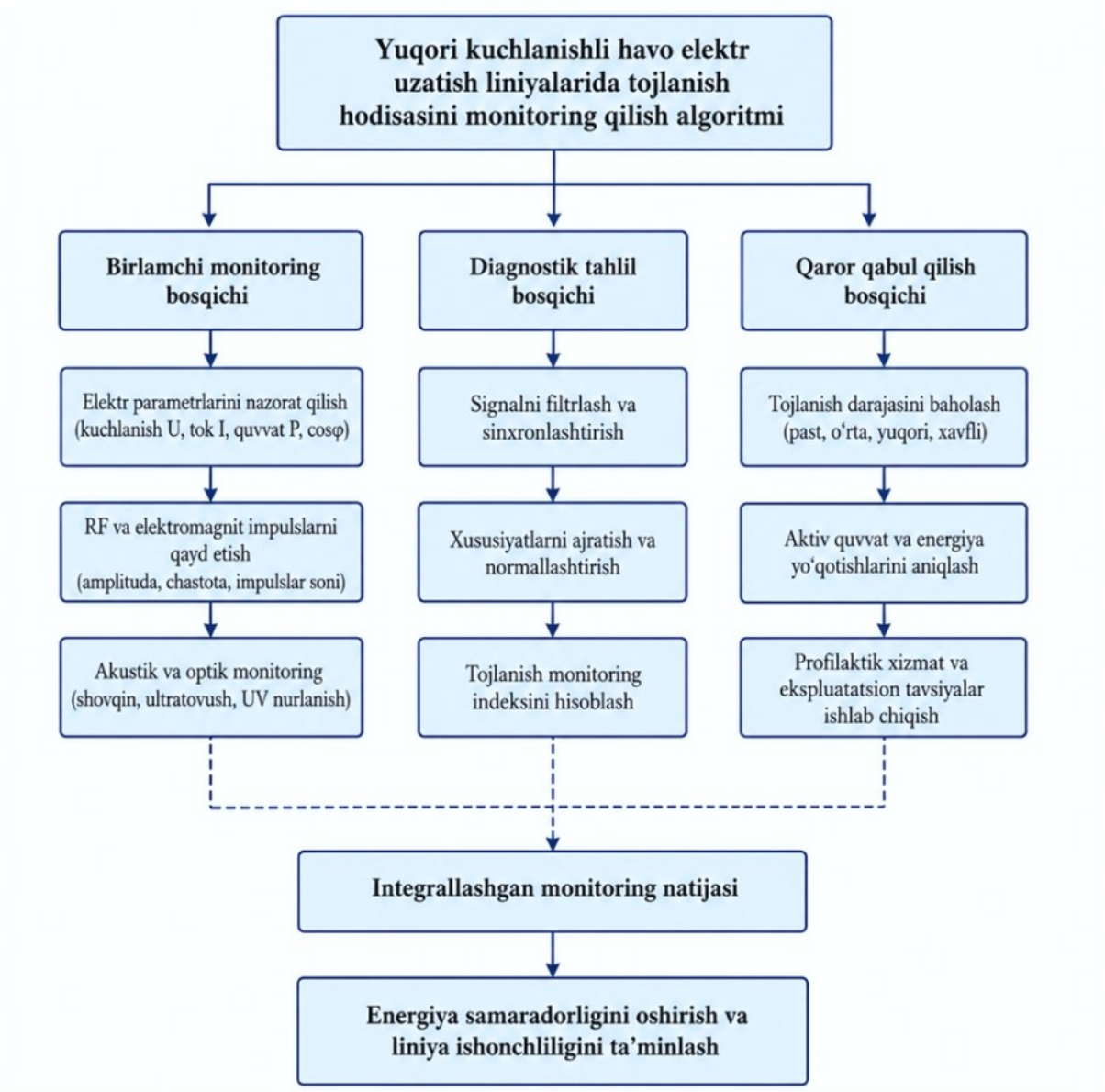
Grafik natijalari sensorlardan birlashtirilgan ko‘rsatkich bilan tojlanish xavfi balli o‘rtasida yaqin dinamik bog‘lanish mavjudligini ko‘rsatadi. Yog‘ingarchilik paydo bo‘lgan vaqt oralig‘ida ikkala monitoring ko‘rsatkichining sakrashsimon oshishi tizimning tashqi muhitdagi keskin o‘zgarishlarga yuqori sezgir ekanini tasdiqlaydi. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini aniqlash va baholash uchun mo‘ljallangan multiparametrli monitoring konsepsiyasi mavjud bo‘lib, konsepsiya elektr, elektromagnit, akustik, optik va meteorologik monitoring kanallarini yagona tizimga birlashtirish orqali tojlanish jarayonlarini kompleks nazorat qilish, diagnostika aniqligini oshirish hamda ishonchli ekspluatatsion qarorlar qabul qilish imkonini beradi (7-rasm).



7-rasm. Tojlanish hodisasini aniqlash va баҳолашда elektr, elektromagnit, akustik, optik hamda meteorologik parametrlar asosida qurilgan multiparametrli monitoring tizimi konsepsiyasi

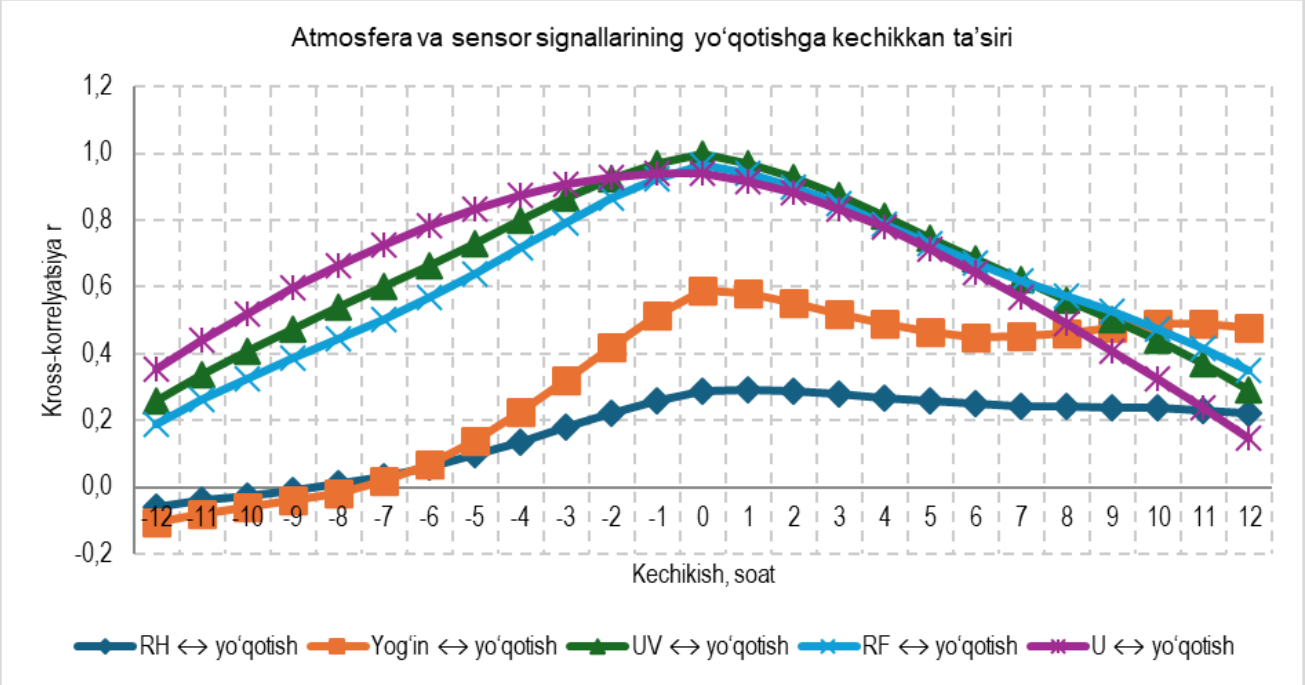
Rasmda yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini monitoring qilish uchun qo‘llaniladigan asosiy nazorat kanallari, ya’ni elektr parametrlar, elektromagnit impulslar, akustik signallar, optik kuzatuv vositalari va meteorologik omillar o‘zaro integratsiyalashgan holda tasvirlangan.

Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini aniqlash, diagnostika qilish va uning energetik oqibatlarini baholashning ketma-ket bosqichlarini ifodalashda quyidagi (8-rasm) dagi algoritmdan foydalanamiz. Dastlab elektr, radiochastotali elektromagnit, akustik va optik signallar qayd etilib, keyingi bosqichda ular sinxronlashtiriladi, shovqinlardan tozalanadi, normallashtiriladi hamda diagnostik xususiyatlari ajratib olinadi. Olingan ko‘p parametrli ma’lumotlar asosida tojlanish monitoring indeksi, aktiv quvvat va elektr energiyasi yo‘qotishlari aniqlanib, tojlanish darajasiga muvofiq profilaktik va ekspluatatsion qarorlar shakllantiriladi.



8-rasm. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini kompleks monitoring qilish algoritmi

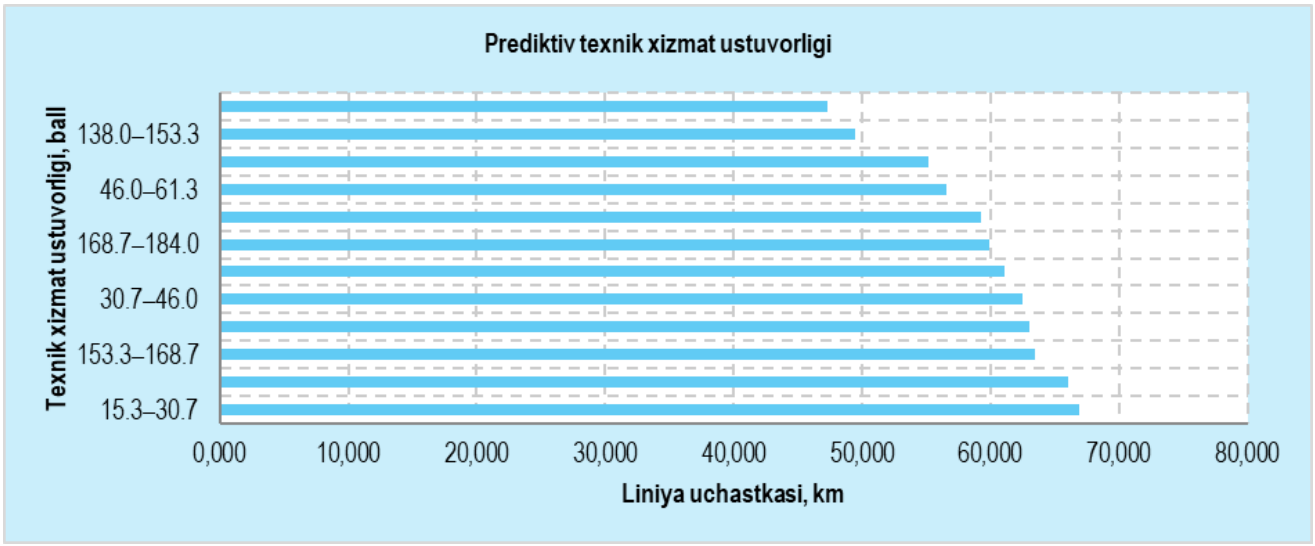
Algoritm tojlanish jarayonini elektr, elektromagnit, akustik va optik monitoring kanallari orqali kompleks baholashga asoslangan. Signallarni qayta ishlash natijasida tojlanish darajasi va energiya yo‘qotishlari aniqlanib, liniyaning ishonchliligini oshirishga qaratilgan texnik qarorlar qabul qilinadi.Tojlanish bilan bog‘liq quvvat yo‘qotishlariga atmosfera omillari hamda diagnostik sensor signallarining vaqt bo‘yicha kechikkan ta’sirini aniqlash maqsadida o‘zaro kross-korrelyatsion tahlil amalga oshirildi. Ushbu tahlil namlik, yog‘ingarchilik, ultrabinafsha nurlanish, radiochastotali signal va liniya kuchlanishining yo‘qotishlar bilan bog‘lanish darajasi hamda maksimal korrelyatsiya kuzatiladigan vaqt siljishini baholash imkonini beradi (9-rasm).



9-rasm. Atmosfera va sensor signallarining tojlanish yo‘qotishlariga kechikkan ta’sirini kross-korrelyatsion baholash

Tojlanish hodisasini monitoring qilish natijalarini amaliy ekspluatatsion qarorlarga aylantirish uchun havo elektr uzatish liniyasining alohida uchastkalari bo‘yicha texnik xizmat ko‘rsatish ustuvorligini aniqlash muhim hisoblanadi. Bunda har bir uchastkaning tojlanish xavfi, energiya yo‘qotishlari darajasi, uskunalarning texnik holati va elektr ta’minotidagi ahamiyati yagona ustuvorlik ko‘rsatkichi orqali baholanadi (10-rasm).

Grafikda liniyaning 0–184 km oralig‘idagi uchastkalari texnik xizmat ko‘rsatish ustuvorlik ballari bo‘yicha taqqoslangan. Eng yuqori ustuvorlik qiymatlari 15,3–30,7 km va 76,7–92,0 km uchastkalarida kuzatilgani ushbu hududlarda tojlanish faolligi, energetik yo‘qotishlar yoki uskunalarning texnik holati bilan bog‘liq xavf yuqoriroq ekanini ko‘rsatadi. Ustuvorlik ballining oshishi tegishli uchastkani birinchi navbatda ultrabinafsha, radiochastotali va akustik diagnostikadan o‘tkazish, o‘tkazgich hamda izolyatorlar sirtini tekshirish va zarur profilaktik tadbirlarni amalga oshirish kerakligini bildiradi. Ushbu yondashuv texnik xizmat ko‘rsatishni qat’iy davriylik asosida emas, balki monitoring natijalari va real texnik holatga asoslangan holda tashkil etish imkonini beradi.



10-rasm. Tojlanish monitoringi natijalari asosida havo elektr uzatish liniyasi uchastkalari uchun hisoblangan prediktiv texnik xizmat ko‘rsatish ustuvorlik ko‘rsatkichlari

Shunday qilib, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini multiparametrli monitoring qilish nafaqat razryad mavjudligini aniqlash, balki xavfli uchastkalarni saralash va texnik xizmat ko‘rsatish ketma-ketligini optimallashtirish imkonini ham beradi. Prediktiv yondashuv avariya xavfini kamaytirish, energiya yo‘qotishlarini cheklash va ekspluatatsion xarajatlarni oqilona rejalashtirishga xizmat qiladi.

Xulosa

O‘tkazilgan nazariy va ilmiy-texnik tahlil yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini faqat bitta fizik parametr orqali ishonchli aniqlash mumkin emasligini ko‘rsatdi. Tojlanish jarayoni elektr maydon kuchlanganligi, liniya toki va aktiv quvvat isrofi bilan bir qatorda radiochastotali elektromagnit impulslar, akustik shovqin, ultrabinafsha nurlanish hamda meteorologik omillarning o‘zaro bog‘langan ta’siri ostida rivojlanadigan murakkab, nochiziqli va vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan elektrofizik hodisa hisoblanadi. Shu sababli elektr, elektromagnit, akustik, optik va meteorologik axborot kanallarini yagona diagnostik muhitda sinxron birlashtirishga asoslangan multiparametrli monitoring konsepsiyasi tojlanishni aniqlashning nazariy jihatdan asoslangan yechimi sifatida shakllantirildi.Taklif etilgan monitoring yondashuvida liniyaning ishchi kuchlanishi va faza toki tojlanishni yuzaga keltiruvchi sababiy parametrlar, elektromagnit nurlanish, akustik signal, ultrabinafsha intensivlik va aktiv quvvat isrofi esa jarayonning natijaviy diagnostik belgilari sifatida qaraladi. Parametrlarni normallashtirish, vazn koeffitsiyentlari orqali integrallash va tojlanish monitoring indeksini shakllantirish turli fizik tabiatga ega signallarni yagona o‘lchov mezoniga keltirish imkonini beradi. Bunday tuzilma alohida sensorlarning shovqin, tashqi xalaqit yoki vaqtinchalik nosozliklar ta’sirida noto‘g‘ri axborot berish xavfini kamaytirib, monitoring natijalarining diagnostik barqarorligini oshiradi.

L–Bessopan 220 kV havo elektr uzatish liniyasi uchun qabul qilingan nominal kuchlanish, liniya uzunligi, harorat, atmosfera bosimi, nisbiy namlik, changlanish indeksi, shamol tezligi va akustik signal qiymatlari tojlanish holatini real ekspluatatsion sharoitlarga yaqinlashtirilgan holda baholash imkonini bergan. Mazkur parametrlar asosida solishtirma tojlanish quvvatini atmosfera va o‘tkazgich sirti holatiga mos ravishda korreksiyalash hamda liniya bo‘yicha umumiy quvvat va energiya isroflarini aniqlashga yo‘naltirilgan energetik model shakllantirilgan. Natijalar liniya kuchlanishi kritik sohaga yaqinlashganda tojlanish yo‘qotishlarining nochiziqli ravishda ortishini, nisbiy namlik va yog‘ingarchilik esa o‘tkazgich sirtidagi elektr maydonning mahalliy notekisligini kuchaytirib, razryad intensivligini oshirishini ko‘rsatadi. Nam sharoitda radiochastotali signal amplitudasining quruq sharoitdagiga nisbatan yuqoriligi atmosfera holati monitoring algoritmida oddiy yordamchi ko‘rsatkich emas, balki diagnostik natijalarni korreksiyalovchi muhim omil ekanini tasdiqlaydi. O‘lchangan tojlanish yo‘qotishlari, gibrid prognoz va nazariy Peek modeli o‘rtasidagi taqqoslash fizik modelning umumiy tendensiyani tavsiflash imkoniyatiga ega ekanini, biroq keskin o‘zgaruvchan meteorologik va ekspluatatsion holatlarda ma’lumotlarga asoslangan gibrid yondashuv yuqoriroq moslashuvchanlik namoyon etishini ko‘rsatadi. Sensorlardan integrallashgan ko‘rsatkich va tojlanish xavfi ballining yog‘ingarchilik davrida birgalikda keskin ortishi monitoring tizimining tashqi muhit o‘zgarishlariga sezgirligini va avariyaoldi holatlarini erta aniqlash imkoniyatini asoslaydi. Ishlab chiqilgan algoritm birlamchi signallarni qayd etish, vaqt bo‘yicha sinxronlashtirish, shovqinlardan tozalash, diagnostik belgilarni ajratish, normallashtirish, integral monitoring indeksini hisoblash, tojlanish darajasini tasniflash va energetik oqibatlarni baholash bosqichlarini yagona funksional ketma-ketlikka birlashtiradi. Natijada monitoring tizimi oddiy kuzatuv vositasidan texnik holatni baholash, xavfli liniya uchastkalarini aniqlash, profilaktik xizmat ko‘rsatish muddatlarini optimallashtirish va ekspluatatsion qarorlarni shakllantirishga xizmat qiluvchi intellektual diagnostika platformasiga aylantiriladi.

Bibliografik ro'yxati:

1. Ibodullayev M.I,Tovboyev A.N., Yesenbekov A.K., Nazarov A.I. Avtoparametrik tebranishlarni tahlil qilishda chastota-energiya munosabatlari // «O'zbekiston Konchilik xabarnomasi» ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoiy, 2017. № 2. 165-167 betlar.
2. Tovboyev A.N., Norqulov A.O., Tog‘ayev I.B. The equation of motion of subgarmonic fluctuations in three-phase chains with three-phase ferromagnetic elements. International Journal of Advanced Studies in science, technology and technology. -India, copyright to the IJARSET volume 6. № 10. October 2019. 11207-11210 pt.
3. Tovboyev A.N., Tog‘ayev I.B., Nodirov G’.Y. Statistical analysis of power waste in 6-10 kV tension overhead electrical transmission lines // International Journal of Advanced Research in Science Engineering and Technology. -India, volume 9. № 11. November 2022. 2-7 pt.
4. Савина Н.В., Мясоэдов Ю.В. Систематические исследования потер электрознергии при работе распределителних электрических сетей // Вестник ИрГТУ. -Москва, 2012. № 1. 142-148 стр.
5. Mavlonov J.A., Mardonov D.Sh. “Rudani yanchuvchi tegirmonlarni elektr energiya samaradorligini oshirish usullari” // «O'zbekiston Konchilik xabarnomasi» ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali.– Navoiy, 2022. № 3.102-104 betlar.
6. Tovboyev A.N., Baynazarov G.G., Jumayev Z.I. Analysis of third-order subarmonic oscillations in three-phase chains with a divided ferromagnetic element. International Journal of Advanced Studies in science, technology and technology.- India, copyright to the IJARSET volume 6. № 12. December 2019. 12229-12233 pt.
7. Tovboyev A.N., Ibadullayev M.I., Murodov H.Sh., Narzullayev B.Sh. Yuqori kuchlanishli elektr tarmoq va tizimlarida subgarmonik ferrorezonans. «O‘zbekiston konchilik xabarnomasi» ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoi, 2020. №4. 110-113 betlar
8. Tog’ayev I.B.,Tursunova A.A., Eshmirzayev M.A. Monitoring of overhead power lines.// Problems and scientific solutions.- Australia, volume 6. № 2. October 2022. 267-271 pt.
9. Tog’ayev I.B., Isoqulov D.SH., Turniyozov Z.A. Monitoring of air power lines with an assessment of their condition // Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies (CARJIS).- India, volume 2. № 5. May 2022. 2181-2454 pt
10. Tovboyev, A.N., Togayev, I.B., Uzoqov, I.Q., Nodirov, G.Y. Use of reactive power sources in improving the quality of electricity. E3S Web of Conferences, 2023, 414, 03001.
11. Tovbaev, A., Boynazarov, G., Togaev, I. Improving the quality of electricity using the application of reactive power sources.E3S Web of Conferences, 2023, 390, 06032

12. O.Jumaev, M. Ismoilov, D. Raxmatov, A.Qalandarov, Enhancing abrasion resistance testing for linoleum and rubber products: A proposal for improved device operation, E3S Web of Conferences 525, 05012 (2024)
13. Raximov, F., Taslimov, A., Majidov, A., & Norqulov, A. In E3S Web of Conferences (Vol. 525, p. 03009)
14. Ziyodullo Eshmurodov, and Shukhrat Abdullaev. E3S Web of Conferences 548, 06013 (2024)
15. A. I. Karshibaev, B. Sh. Narzullaev and H. Sh. Murodov, Journal of Physics: Conference Series 1679 022074 (2020)
16. Javokhir Boboqulov and Bobur Narzullayev,E3S Web of Conferences 525, 2024



Товбоев Акрам Нурмонович – профессор кафедры «Электроэнергетика», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, доцент
E-mail: tovboyev70@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2677-6977

Akram Nurmonovich Tovbaev – Professor at the Department of Electric Power Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies, DSc, Associate Professor
E-mail: tovboyev70@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2677-6977

Tovbayev Akram Nurmonovich – “Elektr energetikasi” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, dotsent
E-mail: tovboyev70@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2677-6977



Тогаев Ислом Бекпулат угли – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Навоийский государственный горно-технологический университет,
E-mail: togayev.islom@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4481-874X

Islom Bekpulat ugli Togaev – Senior Lecturer at the Department of Electric Power Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: togayev.islom@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4481-874X

Tog‘ayev Islom Bekpo‘lat o‘g‘li – “Elektr energetikasi” kafedrasi katta o‘qituvchisi, Navoiy davlat konchilikva texnologiyalar universiteti
E-mail: togayev.islom@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4481-874X

UO‘K 621.315.1:621.391:551.578.46 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.15

YUQORI KUCHLANISHLI HAVO LINIYALARINING SAMARADORLIGINI OSHIRISHDA MUZLASH JARAYONLARINI OLDINI OLISH USULARINI ISHLAB CHIQISH

A.I. Qarshibayev, F.N. Raxmonov

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O’zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Maqolada yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida qor va muz qoplamalarining hosil bo‘lishini erta aniqlash hamda ularni liniyani tarmoqdan ajratmasdan yuqori chastotali signal asosida bartaraf etish usuli tadqiq qilinadi. Tadqiqot obyekti sifatida “Bessopan–Gorniy 220 kV” havo elektr uzatish liniyasi uchastkasi tanlangan. Muammo shundan iboratki, muz qoplami simning mexanik yuklanishini oshiradi, tayanch va armaturalarga qo‘shimcha zo‘riqish beradi, avariyaviy uzilishlar xavfini kuchaytiradi hamda sanoat iste’molchilarining elektr ta’minoti barqarorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Tadqiqotning maqsadi meteorologik va mexanik parametrlarni real vaqt rejimida kuzatish, muzlash xavfini integral indeks orqali baholash va yuqori chastotali tok yordamida sim sirtida lokal issiqlik ajratish algoritmini ishlab chiqishdan iborat. Metod sifatida tenzodatchiklar, harorat va namlik modullari, shamol tezligi o‘lchagichlari, markaziy nazoratchi, GSM/GPRS aloqa kanali, SCADA vizualizatsiyasi, yuqori chastotali generator, quvvat kuchaytirgichi, ulash kondensatori va liniya to‘sig‘idan tashkil topgan tizim sxemasi qo‘llanildi. Natijalar tizim signalni dispetcherlik markaziga 15–20 soniyada yetkazishi, simdagi qo‘shimcha yuklamani 5 foizgacha aniqlikda qayd etishi va eritish rejimini optimal vaqtda ishga tushirishi mumkinligini ko‘rsatdi. Yangilik shundaki, maqolada muzlashni aniqlash, qaror qabul qilish va yuqori chastotali skin-effekt asosida avtomatik eritish bitta boshqaruv konturida birlashtirilgan.*

Kalit so‘zlar: *yuqori kuchlanishli havo liniyasi; muz qoplami monitoringi; yuqori chastotali signal; skin-effekt hodisasi; avtomatik muz eritish; liniya to‘sig‘i; ulash kondensatori; real vaqt nazorati; dispetcherlik boshqaruvi; mexanik yuklama diagnostikasi; meteorologik kuzatuv tizimi; elektr ta’minoti ishonchliligi.*

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Каршибаев А.И., Рахмонов Ф.Н.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В статье исследуется способ раннего выявления гололёдно-изморозевых отложений на высоковольтных воздушных линиях электропередачи и их устранения с применением высокочастотного сигнала без отключения линии от сети. Объектом исследования выбран участок воздушной линии электропередачи «220 кВ Бессопан–Горный». Рассматриваемая проблема связана с тем, что образование льда увеличивает механическую нагрузку на провод, создаёт дополнительное напряжённое состояние опор и арматуры, повышает риск аварийных отключений и ухудшает устойчивость электроснабжения промышленных потребителей. Цель исследования состоит в разработке системы, обеспечивающей мониторинг метеорологических и механических параметров в режиме реального времени, оценку риска обледенения по интегральному индексу и автоматическое включение режима локального нагрева поверхности провода высокочастотным током. В качестве методов использованы схема с тензодатчиками, модулями измерения температуры и влажности, датчиком скорости ветра, центральным контроллером, каналом связи GSM/GPRS, визуализацией SCADA, высокочастотным генератором, усилителем мощности, конденсатором связи и линейным заградителем. Полученные результаты показывают, что система способна передавать предупреждающий сигнал в диспетчерский центр за 15–20 секунд, фиксировать дополнительную нагрузку на провод с точностью до 5 процентов и запускать режим плавки в оптимальный момент. Научная новизна заключается в объединении диагностики обледенения, автоматического принятия решения и высокочастотного нагрева на основе скин-эффекта в едином контуре управления.*

Ключевые слова: *высоковольтная воздушная линия; мониторинг гололёдных отложений; высокочастотный сигнал; явление скин-эффекта; автоматическая плавка льда; линейный заградитель; конденсатор связи; контроль в реальном времени; диспетчерское управление; диагностика механической нагрузки; метеорологическая система наблюдения; надёжность электроснабжения.*

DEVELOPMENT OF ANTI-ICING METHODS TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF HIGH-VOLTAGE OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

A.I. Karshibaev, F.N. Rakhmonov

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *The article investigates a method for early detection of ice and wet-snow deposits on high-voltage overhead transmission lines and their removal by means of a high-frequency signal without disconnecting the line from the power network. The "Bessopan–Gorny 220 kV" overhead transmission line section was selected as the research object. The problem addressed in the study is that ice accretion increases the mechanical load on the conductor, produces additional stress on towers and fittings, raises the probability of emergency outages, and reduces the stability of power supply to industrial consumers. The aim of the research is to develop a system for real-time monitoring of meteorological and mechanical parameters, estimation of icing risk using an integral index, and automatic activation of localized conductor-surface heating by high-frequency current. The methodology combines strain sensors, temperature and humidity modules, wind-speed measurement, a central controller, GSM/GPRS communication, SCADA visualization, a high-frequency generator, a power amplifier, a coupling capacitor, and a line trap. The results indicate that the proposed system can transmit warning information to the dispatching center within 15–20 seconds, detect additional conductor loading with an accuracy of up to 5 percent, and start the de-icing mode at an optimal moment. The novelty of the work lies in integrating icing diagnosis, decision-making, and high-frequency skin-effect-based automatic de-icing into a single control loop for a 220 kV operating overhead line.*

Key words: *high-voltage overhead line; ice accretion monitoring; high-frequency signal; skin-effect phenomenon; automatic ice melting; line trap; coupling capacitor; real-time control; dispatching supervision; mechanical load diagnostics; meteorological observation system; power supply reliability.*

Kirish

Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida muz va qor qoplamalarining shakllanishi elektr energetika tizimining ekspluatatsion ishonchliligiga bevosita ta'sir qiladi. Simlarda muz massasi ortishi mexanik tortilish kuchini oshiradi, tayanchlarning og'ishiga, armatura elementlarining zo'riqishiga va favqulodda uzilishlarning yuzaga kelishiga sabab bo'lishi mumkin. Xalqaro tajribada havo liniyalarini qish sharoitida himoya qilish uchun mexanik, termik, meteorologik va masofaviy monitoringga asoslangan yechimlar qo'llaniladi [1]. So'nggi yillarda havo liniyalarida muzlanish jarayonini kuzatish uchun optik, mexanik va intellektual monitoring usullari ham keng tadqiq qilinmoqda [2, 3].

Mavjud usullarning muhim kamchiligi shundaki, ular ko'pincha muz qatlami kritik darajaga yaqinlashgandan keyin choralar ko'rishga majbur qiladi yoki liniyani tarmoqdan ajratish zarurati tug'iladi. Sanoat korxonalari elektr ta'minoti uchun bunday uzilishlar iqtisodiy zarar, texnologik jarayonlarning to'xtashi va ta'mirlash xarajatlarining ortishi bilan bog'liq. Shu sababli maqolada "Bessopan–Gorniy 220 kV" havo elektr uzatish liniyasi misolida muzlash xavfini real vaqt rejimida aniqlash va yuqori chastotali signal yordamida avtomatik eritish usuli taklif qilinadi.

Tadqiqotning maqsadi meteorologik va mexanik kuzatuv ma'lumotlari asosida muzlash xavfini baholash, yuqori chastotali energiyani liniya simiga xavfsiz kiritish va skin-effekt hisobiga sim sirtida lokal issiqlik ajratish orqali muz qoplamasini bartaraf etish algoritmini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqotning vazifalari: datchiklar majmuasini tanlash, ma'lumot uzatish zanjirini ishlab chiqish, yuqori chastotali kiritish sxemasini asoslash, natijalarni an'anaviy eritish usullari bilan qiyoslash hamda tizimning ekspluatatsion afzalliklarini baholashdan iborat.

2. Materiallar va metodlar (Materials and Methods)

Tadqiqot obyekti sifatida O'zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi hamda "Navoiy kon-metallurgiya kombinati" aksiyadorlik jamiyati tizimi bilan bog'liq "Bessopan–Gornly 220 kV" yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi uchastkasi ko'rib chiqildi. Tadqiqotda simdagi mexanik tortilish kuchi, havo harorati, nisbiy namlik, shamol tezligi va yog'ingarchilik intensivligi muzlash xavfini belgilovchi asosiy omillar sifatida qabul qilindi. Yuqori kuchlanishli havo liniyalarida qor va muz qoplamalarining hosil bo'lish jarayonlarini tezkorlik bilan aniqlash va oldini olishga qaratilgan samarali, avtomatlashtirilgan usullarni ishlab chiqishda ehtimoliy nazariya formulasidan aniq vaqtda baholash maqsadida quyidagi ko'p faktorli modeldan foydalanamiz:

$$I_{muz\ erishish} = f(T, RHV_{shamol\ tez}, P_{\text{yog'ingarchilik}}, t) \cdot C \quad (1)$$

bu yerda: T – havo harorati (°C), RH – havodagi nisbiy namlik (%), $V_{shamol\ tez}$ – shamol tezligi (m/s), $P_{yog'ingarchilik}$ – yog'ingarchilik intensivligi (mm/soat), t – ta'sir vaqti (soat), $I_{muz\ eritish}$ – muzlashning ehtimoli indeksi, C – korreksiya koeffitsienti (hududga va mavsumga bog'liq), f – kompleks funksiya.

Ushbu ko'rsatilgan shartlarda yuqori kuchlanishli havo liniyalarida qor va muz xavfi bor deb hisoblanadi.

$$\begin{cases} T \le 0.5^{\circ}C \\ RH \ge 80\% \\ P_{\text{yog'ingarchilik}} > 0 \\ V_{shamol\ tez} \le 10\ m/s \end{cases} \quad (2)$$

Ushbu modellardan kelib chiqib, yuqori kuchlanishli havo liniyalarida qor va muzlarning oldini olishda yuqori chastotali signallar orqali bartaraf etish usulini ishlab chiqish innovatsion yechim hisoblanadi. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining muzlash jarayonlarini oldini olishga qaratilgan usul amaliy jihatdan muhim hisoblanib, energetika tarmog'ining ishonchli va uzluksiz faoliyat yuritishini ta'minlashga xizmat qiladi.

Tadqiqot ob'ekti sifatida "O'zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi" va "Navoiy kon-metallurgiya kombinati" AJga qarashli "Bessopan-Gorniy 220 kV" yuqori kuchlanishli havo liniya uchastkasida muzlash holatlarini nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo'lgan taklif etilayotgan tizimning tarkibiy qismlariga quyidagilar kiradi:

1. Simning tortilish kuchini o'lchovchi tenzodatchiklar, havo harorati va namligini qayd etuvchi meteostansiya modullari. Ma'lumotlarni yig'ish va birlamchi qayta ishlash darajasi bu daraja bevosita yuqori

kuchlanishli havo elektr uzatish liniyaning tayanch va simlariga o‘rnatilgan sezgir elementlardan iborat:

Simdagi muz qalinligini mexanik usul bilan baholash uchun simning tortilish kuchini doimiy o‘lchovchi yuqori aniqlikdagi tenzodatchiklar jihozlandi.

Liniya atrofidagi mikroiqlim sharoitlarini aniq vaqt rejimida kuzatish uchun havo harorati va nisbiy namligi hamda shamol tezligini qayd etuvchi avtonom meteostansiya modullari o‘rnatildi. Ushbu ma’lumotlar muzlash xavfini bashorat qilish va yuqori chastota diagnostika algoritmini korreksiya qilish uchun ishlatiladi.

2. Ma’lumotlarni uzatish darajasi datchiklar va meteomodullardan olingan birlamchi analog va raqamli signallar markaziy nazoratchi tomonidan yig‘iladi va TCP/IP protokoli bo‘yicha standartlashtiriladi. Yig‘ilgan ma’lumotlarni masofadan turib dispetcherlik punktiga uzatish uchun ishonchli GSM/GPRS kommunikatsiya kanallaridan foydalanildi. Bu ma’lumotlarni uzluksiz va aniq vaqt rejimida olishni ta’minlaydi.

3. Kommunikatsiya kanallari orqali uzatilgan ma’lumotlar nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizimning markaziy serveriga kelib tushadi. Kelib tushgan signallar qayta ishlanadi va fizik kattaliklarga aylantiriladi, ma’lumotlarni ma’lumotlar bazasida arxivlashtiradi. Ishlab chiqilgan algoritmlar masalan, yuqori chastotali signallarning so‘nishini hisoblash yoki Fisher mezonini baholash asosida hisob-kitoblarni amalga oshiradi. Natijalarni grafiklar va mnemosxemalar shaklida vizualizatsiya qiladi va operatorni muzlash xavfi haqida ogohlantiradi.

Tadqiqot natijalari asosida nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizimining joriy etilishi an’anaviy usullariga nisbatan quyidagi afzalliklarga ega hisoblanadi. Olib borilgan eksperiment ma’lumotlarga ko‘ra, muz hosil bo‘lish jarayonining boshlanishi va kritik nuqtaga yetishi haqidagi signal dispetcherlik markaziga o‘rtacha 15–20 soniya ichida yetib boradi. An’anaviy usulda esa tizimda ishlaydigan xodimlar orqali ma’lumotlar bir necha soat vaqtda ma’lum bo‘lardi.

“Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalariga o‘rnatilgan datchiklar simdagi qo‘shimcha yuklamani 5% gacha aniqlikda qayd etdi va ushbu holat an’anaviy usulda umuman amalga oshirilmaydi. Tizimning avtomatik tarzda simlardagi muzlarni eritish rejimini ishga tushirishi natijasida, eritish uchun sarflanadigan elektr energiyasi miqdori 12-15% ga tejaladi. Buning sababi muz qoplamalari qalinlashmasdan turib, eritish jarayoni optimal vaqtda ishga tushirilgani bilan izohlanadi.

Olingan eksperimental ma’lumotlar shuni tasdiqladiki, taklif etilayotgan nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizim “Navoiy kon-metallurgiya kombinati” AJga qarashli iste’molchilarni elektr energiyasi bilan ta’minlovchi “Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyarida avariya va shikastlanish holatlarini oldindan bashorat qilish evaziga tizimning samaradorligi 98% gacha oshiriladi. nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizimdagi datchiklarning texnik ko‘rsatkichlari 1-jadvalda ko‘rsatilgan.

1-jadval

Tizimdagi datchiklarning texnik ko‘rsatkichlari

Datchik turlari	O‘lchash parametri	O‘lchash diapazoni	Aniqlik darajasi (Xatolik-%)	Chiqish signali
Tenzodatchik HBM C16A	Mexanik kuch kN	0 — 5000 kg (50 kN)	0.1	4-20 mA / RS-485
Termodatchik Vaisala HMT130	Harorat °S	-50 +80	0.5	Ra (Qarshilik)
Gigrometr Vaisala HMT130	Namlik %	0 — 100%	3	0-10 V
Anemometr Lufft VENTUS-UMB	Shamol tezligi m/s	0 — 60 m/s	1	Impulsli

Natijalar

Taklif etilgan tizimda muzlash jarayoni datchiklar va meteostansiya ma’lumotlari asosida aniqlanadi. Boshqaruv algoritmi simdagi muz qalinligi 5 mm dan oshishi, nisbiy namlikning 78 foizdan yuqori bo‘lishi yoki shamol tezligining 10,5 m/s dan ortishi kabi shartlar bajarilganda yuqori chastotali eritish rejimini ishga tushiradi. Tizim xavfni aniqlagandan so‘ng 0,5–1,0 sekund oralig‘ida generator va kuchaytirgichni faollashtirish buyrug‘ini beradi. Signal dispetcherlik markaziga o‘rtacha 15–20 sekund ichida yetib boradi.

Ushbu usulning ilmiy asosi "Skin-effekt" (Sirtqi effekt) hodisasiga tayanadi. Odatda, liniyalarda 50 Gs chastotali tok o‘tkazgichning butun ko‘ndalang kesim bo‘ylab oqadi. Ammo chastota oshirilganda tok o‘tkazgichning markazidan qochib, uning sirtqi qismiga ya’ni tashqi tomonidan aylana boshlaydi natijada simning faol qarshiligi (*R*) keskin oshadi. Joul-Lens qonuniga ko‘ra, *(Q=I²Rt)* qarshilik oshgani sababli, kamroq tok bilan ham ko‘proq issiqlik ajraladi. Issiqlik aynan simning sirtida ya’ni, muz yopishgan joyda hosil bo‘ladi, bu esa liniya simlaridagi muzlarni tezroq eritadi. Bunda “Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyalarining chastotasi f_1 = *50 Gs* bilan bir vaqtda, tizim orqali liniyalarga yuqori chastotali tok f_2 = *3 kGs dan 5 kGs gacha* uzatiladi.

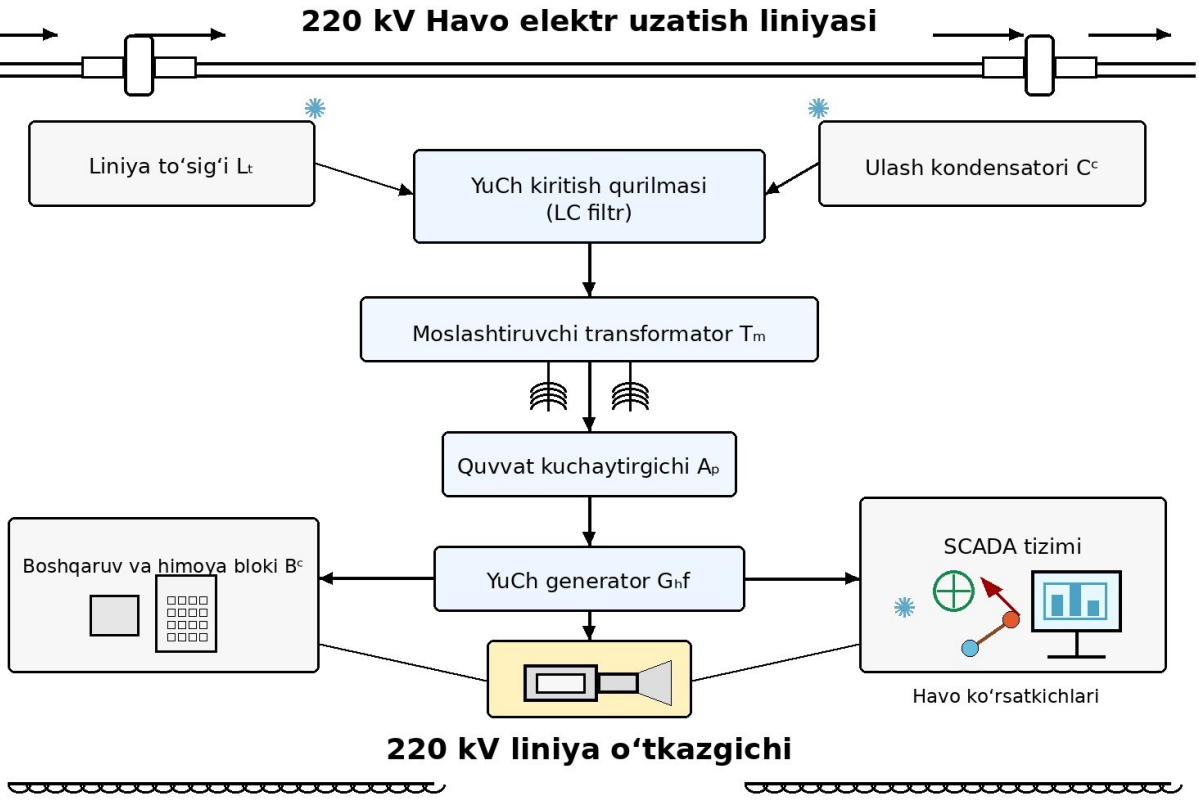
Bessopan-Gornыy 220 kV yuqori kuchlanishli havo liniyalari simidan oquvchi natijaviy tokning samaradorlik qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$I_{samaradorlik} = \sqrt{I_{50\ Gs}^2 + I_{Gs}^2} \qquad (3)$$

bu yerda: $I_{samaradorlik}$ – simning qizishini ta’minlovchi umumiy samaradorlik tokining qiymati, (A); $I_{50\ Gs}^2$ – liniyadagi mavjud yuklama tok; I_{Gs} – muz eritish generatoridan uzatilayotgan yuqori chastotali tok.

Tizimning ishlash algoritmi quyidagicha:

1. “Bessopan – Gorniy 220 kV” kuchlanishli tranzit havo liniyasining har ikki chekka hududida (bosh va oxirgi podstansiyalarning kirish yacheykalarida) maxsus sozlangan L-C rezonans konturiga ega bo‘lgan to‘suvchi g‘altaklar o‘rnatiladi. Mazkur qurilmalarning asosiy vazifasi — tarmoqning 50 Gs chastotali tokini o‘zidan to‘siqsiz o‘tkazish va aksincha, muz eritish maqsadida uzatilgan yuqori chastotali signallar uchun kuchli elektromagnit to‘siq hosil qilishdir. Buning natijasida yuqori



1-rasm. 220 kV liniyada yuqori chastotali muz eritish tizimining prinsipial sxemasi

chastotali energiya podstansiyaning ichki qurilmalariga transformatorlarga o‘tib ketmaydi, balki aynan muzlagan fazaviy simlarning ichida faqat liniya bo‘ylab yopiq konturda sirkulyatsiya qilishga majbur bo‘ladi.

2. Skin-effekt hisobiga tok simning sirtida issiqlik ajralishini keskin oshiradi.

3. Yuklama toki to‘suvchi g‘altak orqali to‘siqsiz o‘tib, iste’molchi ta’minotini uzmaydi.

Nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizim “Bessopan-Gornly 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyasining ishonchligini oshirish va simlarda muz hosil bo‘lishini diagnostika qilish hamda yuqori chastotali energiya yordamida bartaraf etish tizimining prinsipial sxemasi 1-rasmda ko‘rsatilgan.

1-rasmdagi 220 kV Liniyada yuqori chastotali muz eritish tizimining prinsipial sxemasidagi barcha asosiy qurilmalar va ularning vazifalari quyidagicha:

1. Yuqori chastotali signal hosil qilish zanjiri bu diagnostika va muz eritish uchun zarur bo‘lgan yuqori chastotali energiyasini hosil qiladi va kuchaytiradi hamda yuqori kuchlanishli havo liniyasiga moslashtiradi. Yuqori chastotali generatori diagnostika va muz eritish uchun kerakli bo‘lgan yuqori chastotali elektromagnit signalni yoki to‘lqinni hosil qiladi. Quvvat kuchaytirgichi generatordan chiqayotgan kuchsiz yuqori chastotali signalini liniya bo‘ylab tarqalishini va simdagi muzni eritishga yetarli quvvatga ega bo‘lishi uchun signalni kuchaytiradi. Moslashtiruvchi transformator kuchaytirgichning chiqish qarshiligini liniyaning kirish qarshiligiga moslashtiradi sababi to‘lqin hech qanday to‘siqqa uchramaydi. Yuqori chastotali generator ishlab chiqargan barcha quvvat hech qanday isroflarsiz liniyaga kirib, muzni eritishga sarflanadi.

Yuqori chastotali kiritish qurilmasi (LC Filtr) ulash kondensatori va liniya to‘sig‘i bilan birgalikda ishlaydi. Uning vazifasi yuqori chastotali signalni liniyaga o‘tkazish lekin yuqori kuchlanishli havo liniyasidagi tokni yuqori chastotali qurilmalariga (generator va kuchaytirgichga) o‘tishini to‘sadi natijada generator va kuchaytirgichni kuyishdan saqlaydi.

2. Yuqori chastotali qurilmalarini 220 kV li yuqori kuchlanishli liniyalarga ulash va ajratishni xavfsiz amalga oshirishda ulash kondensatorlari muhim rol o‘ynaydi sababi yuqori kuchlanishli 220 kV liniyani yuqori chastotali zanjiridan galvanik izolyatsiya qiladi . U faqat yuqori chastotali signalni o‘tkazadi lekin 50 Gs chastotasidagi yuqori kuchlanishni to‘sadi. Shu orqali past kuchlanishli nazorat va o‘lchov asboblarini himoya qiladi.

Liniya to‘sig‘i L_t ketma-ket ulangan yuqori chastotali drossel induktivlik. Uning vazifasi 50 Gs chastotadagi tokni to‘siqsiz o‘tkazish, lekin muz eritish va diagnostika uchun ishlatiladigan yuqori chastotali signallari uchun katta qarshilik hosil qilib, uning podstansiya shinalariga o‘tib ketmasligini ta’minlaydi. Shuning uchun yuqori chastotali signal faqat liniya bo‘ylab tarqaladi.

3. Boshqaruv va himoya bloki butun majmuaning ishini nazorat qiladi va ma’lumotlarni yig‘adi. Boshqaruv va Himoya bloki bu tizimning miyasi hisoblanadi. U datchiklardan olingan ma’lumotlarni (masalan, meteorologik ma’lumotlar, signal parametrlari) qayta ishlaydi natijaga qarab yuqori chastotali generator va kuchaytirgichni boshqaradi hamda tizimni avariyaviy holatlardan himoya qiladi.

Nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizimning monitorida grafikalar, mexanik kuch, iqlim parametrlarining belgisini aniq ko‘rsatib turibdi. Nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘lgan tizim dispetcherlik nazorati va ma’lumotlarni yig‘ish tizimi bo‘lib, u liniyadagi va tizimdagi barcha parametrlarni muz qalinligi, harorat, shamol tezligi, namlik, mexanik kuch, signal kuchini aniq vaqt rejimida

2-jadval

Yuqori chastotali signal va an'anaviy usullarning qiyosiy tahlili

Ko'rsatkich nomi	An'anaviy usul O'zgarmas tok - DC yoki 50 Gs	Taklif etilgan YuCh usuli ≈100 kGs	Ustunlik asosi (Ilmiy izoh)
Qizdiriladigan maydon	Butun sim kesimi bo'ylab 240 mm² alyuminiy va po'lat o'zak	Faqat simning sirtqi qatlami qalinligi ≈ 0.08 - 0.1 mm	Skin-effekt YuCh energiya simning ichiga kirmasdan, faqat muz bilan chegaradosh tashqi sirtda harakatlanadi va issiqlik ajratadi
bir metr sim uchun talab etiladigan o'rtacha quvvat	220 – 250 Vt/m	85 – 110 Vt/m	Quvvat faqat sirtni qizdirishga sarflanadi, simning ichki massasini (po'lat o'zakni) behuda qizdirishga energiya yo'qotilmaydi.
Manbaning umumiy quvvati	5 – 10 MVt darajasida (katta tok talab etiladi)	100 – 150 kVt darajasida	YuCh generatori aloqa tizimlariga o'xshash ishlaydi, lekin maxsus kuchaytirgich orqali yuzlab kVt gacha energiya beradi. Bu MVt larga nisbatan o'nlab marta tejamkor hisoblanadi.
Muz eritish vaqti t_{eks}	45 – 60 daqiqa va undan ko'p	15 – 30 daqiqa	Sirtqi qatlamda issiqlikning tezkor konsentratsiyasi hisobiga muzning simga yopishgan joyi tez eriydi va muz massasi o'z og'irligi bilan uzilib tushadi.
Liniyani tarmoqdan uzish zarurati	Shart. Iste'molchilar (masalan, NKMK ob'ektlari) elektr ta'minotisiz qoladi yoki zaxira liniyasiga o'tishi kerak.	Shart emas Nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo'lgan tizim	L-C to'suvchi g'altaklar 50 Gs yuk tokini va YuCh energiyani bir-biridan ajratib (seleksiya qilib) ishlash imkonini beradi.
Iqtisodiy samaradorlik (Avariyaning oldini olish)	Avariya yuz bersagina reaksiya qilinadi. Tiklash xarajatlari yuqori.	Muz eritish doimiy avtomatik nazoratda va liniya uzilishining to'liq oldini oladi	AS-240/39 simining uzilishi va tayanchlarning qulashidan kelib chiqadigan yirik iqtisodiy va ekologik zararlar nolga tushiriladi.

kuzatib boradi va arxivlashtiradi hamda vizuallashtirib beradi. U avtomatik boshqaruv algoritmlarini amalga oshiradi. "Havo ko'rsatkichlari" degan yozuv va ushbu belgilar aynan meteorologik nazoratni anglatadi.

"Bessopan-Gorniy 220 kV" yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining aloqa tizimidagi yuqori chastotali signal bilan nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo'lgan tizimining sxemasi va tuzilishi bo'yicha bir xil, faqatgina ularga qo'yiladigan vazifalar xar xildir. 2-jadvalda taklif etilgan yuqori chastotali signal va an'anaviy usullarining qiyosiy tahlili ko'rsatilgan.

Natijalarni muhokama qilish

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, muzlashga qarshi kurashishda faqat meteorologik ogohlantirish yetarli emas; mexanik yuklama haqidagi ma'lumot bilan birlashtirilgan real vaqtli boshqaruv zarur. Tenzodatchiklardan olingan ma'lumotlar simdagi qo'shimcha massa va tortilish kuchining o'zgarishini bevosita aks ettiradi. Meteorologik modullar esa muz hosil bo'lishi uchun qulay sharoit paydo bo'lishini oldindan baholaydi. Shu ikki manbaning birlashtirilishi noto'g'ri ishga tushishlar ehtimolini kamaytiradi va eritish jarayonini faqat zarur vaqtda faollashtiradi.

Taklif etilgan yechimning asosiy ustunligi — yuqori chastotali energiyaning sim sirtida lokal issiqlik hosil qilishidir. An'anaviy usulda simning butun kesimini qizdirish talab qilinadi, bunda po'lat o'zak va ichki metall massa ham energiya yutadi. Yuqori chastotali signalda esa tokning sirtga siljishi tufayli issiqlik muz bilan bevosita chegaradosh sohada ajraladi. Shu sababli eritish vaqti qisqaradi, energiya sarfi kamayadi va liniyani tarmoqdan uzmasdan ishlash imkoniyati paydo bo'ladi. O'xshash tadqiqotlarda ham havo liniyalari muzlanishini onlayn monitoring qilish va avtomatik boshqaruv bilan birlashtirish dolzarb yo'nalish sifatida ko'rsatilgan [3, 5].

Shu bilan birga, tadqiqotning ayrim cheklovlari mavjud. Birinchidan, yuqori chastotali tokning aniq chastota diapazoni, quvvat darajasi va liniya uzunligiga bog'liq so'nishi tajriba orqali qo'shimcha tekshirilishi kerak. Ikkinchidan, ulash kondensatori va liniya to'sig'ining izolyatsiya mustahkamligi, issiqlik barqarorligi hamda elektromagnit mosligi alohida sinov dasturi asosida baholanishi lozim. Uchinchidan, turli iqlim hududlari uchun korreksiya koeffitsienti C qayta kalibrlanishi talab qilinadi. Kelgusida tizimni raqamli egizak, mashinali o'qitish algoritmlari va uzun muddatli ekspluatatsion statistika bilan to'ldirish maqsadga muvofiq. Shu sababli, tizimda qo'llaniladigan to'suvchi g'altaklar va aloqa kondensatorlari quyidagi talablarga javob berishi shart:

1. Termik barqarorligi, to'suvchi g'altak nafaqat 50 Gs tokni, balki qo'shimcha uzatilayotgan 3 kGs chastotali muz eritish tokini (I > 200A) ham o'zidan o'tkazishga qodir bo'lishi lozim.

2. Izolyatsiya mustahkamligi, kondensatorlar transformatordan chiquvchi yuqori amplitudali kuchlanish impulslariga bardosh berishi lozim.

"Bessopan-Gorniy 220 kV" yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi ekspulatatsiya jarayonida bo'lgani uchun, taklif etilayotgan nazorat qiluvchi va boshqaruv imkoniyatiga ega bo'lgan tizimi murakkab kommutatsiyalarni o'chirib-yoqishlarni bajarishi shart emas. U faqat transformatorni nazorat qilib boshqarib turadi. Nazorat va boshqaruv imkoniyatiga ega bo'lgan tizimining boshqarish jarayoni ketma-ketligi quyidagicha amalga oshiriladi:

1. Liniyadagi datchiklardan va meteostansiyadan olingan ma'lumotlarini integratsiya qilgan holda tizimning serveriga uzatib turadi.

2. Olingan ma'lumotlarni qayta tahlil qiladi masalan, liniya simidagi muz qalinligining diametri 5 mm dan oshsa yoki iqlim parametrlari o'zgarsa ya'ni atmosferadagi havo namligi 78 % dan va shamol tezligi 10.5 m/s dan yuqori bo'lsa.

3. Tahlil ma'lumotlaridan kelib chiqib qaror qabul qiladi.

4. Liniyadagi chastotani 3 kGs gacha oshirish uchun maxsus transformatorni ishga tushirish.

5. Liniya simidagi muzlar erishi natijasida simlarning og'irlik massasi standart holatga kelganda tizim maxsus transformatorga to'xtash buyrig'ini beradi.

"Bessopan-Gorniy 220 kV" yuqori kuchlanishli havo liniyalarini bilan nazorat va boshqaruv tizimini integratsiya qilinganligining afzalligi quyidagicha izohlanadi:

1. Tizim xavfni aniqlaganidan so'ng 0.5 sekundan – 1 sekund vaqt

oralig‘ida liniya simlaridagi muzlarni eritish holatini ishga tushiradi.

2. Liniya simlaridagi muzlarni eritish jarayoni to‘liq tushib ketishi natijasida tizim to‘xtatiladi va ortiqcha energiya sarflanmaydi.

3. Yuqori kuchlanishli havo liniyada xodimlar ishtirokidagi harakatlar amalga oshirilmaydi.

Ushbu usul “Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyasi simining faqat muz qatlami joylashgan qismini eritish uchun talab etiladigan tok miqdorini an’anaviy usulga nisbatan 30% dan-40% gacha kamaytirishi imkonini beradi. Ilk bor “Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyasini tarmoqdan uzmagan holda muz eritishning kombinatsion usuli ishlab chiqildi. Taklif etilgan usul uzluksiz texnologik jarayonga ega hisoblanib, sanoat korxonalari ("Navoiy KMK" AJ) uchun elektr energiyasi ta’minotining barqarorligini ta’minlash hamda “Bessopan-Gorniy 220 kV” yuqori kuchlanishli havo liniyasida muzlash xavfini tezkor aniqlash va inson omilisiz avtomatik eritish holatini ishga tushirish imkonini berdi. Natijada, muzlashni aniqlash va bartaraf etish jarayonining ishonchlilik ehtimolligini 0.43 % dan 0.98 % gacha oshirildi.

Tadqiqot natijalari O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi va “Navoiy kon-metallurgiya kombinati” AJ tizimida amaliyotga joriy etildi. Ishlab chiqilgan tizimning qo‘llanilishi natijasida avariyaviy o‘chishlar soni yiliga o‘rtacha 85 % dan 90% gacha kamaytiriish imkoni yaratildi natijada “Bessopan-Gorniy 220 kV” kuchlanishli havo liniya simlaridagi muzlarni eritish uchun sarflanadigan vaqt 7 barobarga qisqardi.

Xulosa

Bessopan–Gornыy 220 kV havo elektr uzatish liniyasi misolida muzlash xavfini aniqlash va yuqori chastotali signal yordamida bartaraf etishning avtomatlashtirilgan usuli ishlab chiqildi. Tadqiqotda meteorologik parametrlar, simning mexanik tortilish kuchi va yuqori chastotali energiyani liniyaga kiritish sxemasi yagona nazorat-boshqaruv konturida birlashtirildi. Taklif etilgan yondashuv signalni dispetcherlik markaziga 15–20 sekundda yetkazish, qo‘shimcha mexanik yuklamani 5 foizgacha aniqlikda qayd etish va eritish jarayonini optimal vaqtda ishga tushirish imkonini beradi. Yuqori chastotali skin-effekt asosidagi eritish usuli an’anaviy qizdirish yondashuviga nisbatan energiya sarfini kamaytirishi, liniyani uzmasdan ishlashi va favqulodda uzilishlar xavfini pasaytirishi bilan ahamiyatlidir. Kelgusida tizim parametrlarini real ekspluatatsion ma’lumotlar asosida kalibrlash, chastota-quvvat rejimlarini optimallashtirish va uskunalarning elektromagnit mosligini laboratoriya hamda dala sinovlari orqali tekshirish zarur.

Minnatdorchilik. Mualliflar tadqiqot mavzusi bo‘yicha amaliy ma’lumotlarni shakllantirish, texnik yechimlarni muhokama qilish va tajriba obyektini tanlash jarayonida ko‘mak bergan soha mutaxassislariga minnatdorchilik bildiradi.

Bibliografik ro'yxati:

1. CIGRE. Techniques for Protecting Overhead Lines in Winter Conditions. CIGRE Green Book / Technical publication, 2021.
2. Ma, G., et al. A novel optical load cell used in icing monitoring on overhead transmission lines. Cold Regions Science and Technology, 2012.
3. Wang, L., Chen, Z., Wenjie Zhang, et al. The causes and forecasting of icing events on power transmission lines in Southern China: A review and perspective. Atmosphere, 2023, 14(12), 1815.
4. IEC 60834-1:1999. Teleprotection equipment of power systems — Performance and testing — Part 1: Command systems. International Electrotechnical Commission, 1999.
5. Guo, Z. Intelligent control and optimization of uninterrupted power supply technology for transmission-line de-icing. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2024.



Каршибаев Аскар Илашевич – профессор кафедры «Электроэнергетика», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор технических наук, профессор
E-mail: a_karshibaev@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1088-4041

Askar Ilashevich Karshibaev – Professor of the Department of Electric Power Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies, Doctor of Technical Science, Professor
E-mail: a_karshibaev@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1088-4041

Qarshibayev Asqar Ilashevich – “Elektr energetikasi” kafedrasi professori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari doktori, Professor
E-mail: a_karshibaev@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1088-4041



Рахмонов Фарход Нурмуратович – доцент кафедры «Электроэнергетика», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
E-mail: fararaxmonov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4241-1054

Farkhod Nurmuratovich Rakhmonov – Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD, Associate Professor
E-mail: fararaxmonov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4241-1054

Raxmonov Farxod Normuratovich – “Elektr energetikasi” kafedrasi dotsenti, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent
E-mail: fararaxmonov2020@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4241-1054

UDC 004.8:519.87:681.5:62-50 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.16

ARTIFICIAL INTELLIGENCE–BASED CONTROL MODELS FOR HIGH-DIMENSIONAL NONLINEAR INDUSTRIAL SYSTEMS

O.A. Tuychiyev, O.V. Tuyboyov

Turin Polytechnic University in Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This study proposes a unified hybrid intelligent control framework that integrates physics-informed modeling, data-driven nonlinear representation, causality-aware interaction learning, hierarchical model predictive control, and safety-constrained reinforcement learning within a closed-loop architecture. The proposed framework is designed to capture regime transitions, nonlinear couplings, and uncertainty while ensuring stability, interpretability, and constraint satisfaction. A hybrid state-transition model combining first-principles dynamics with neural residual learning is developed, and causality-aware structure identification is incorporated to reduce spurious correlations and improve robustness. The control strategy employs a hierarchical predictive optimization layer complemented by a reinforcement learning-based adaptive correction mechanism. The framework is validated across multiple high-dimensional nonlinear industrial benchmark scenarios under stochastic disturbances and varying operating conditions. The results demonstrate that the proposed approach reduces one-step-ahead prediction error by 18–27% compared to conventional physics-based models and improves extrapolation accuracy by approximately 21% relative to standalone neural networks. In closed-loop control experiments, the method achieves a 32% reduction in tracking error compared to classical model predictive control and a 41% reduction compared to PID controllers, while decreasing constraint violation rates by up to 48% relative to pure reinforcement learning approaches. Energy efficiency analysis indicates a reduction in cumulative energy consumption by 6.3–9.1% compared to conventional MPC and up to 11.4% compared to rule-based control strategies. Robustness evaluation using Monte Carlo simulations (10,000 scenarios) demonstrates stable performance in 96.8% of cases, with bounded degradation under extreme disturbances. Additionally, computational complexity is reduced by 37% through hierarchical decomposition, enabling real-time applicability with sampling intervals as low as 50 ms.*

Key words: *hybrid intelligent control, nonlinear industrial systems, physics-informed modeling, model predictive control, reinforcement learning, causality-aware modeling, data-driven control, high-dimensional systems, industrial artificial intelligence, robust control, energy-efficient optimization, digital twin systems.*

YUQORI O‘LCHAMLI NOCHIZIQLI SANOAT TIZIMLARI UCHUN SUN’IY INTELLEKTGA ASOSLANGAN BOSHQARUV MODELLARI

O.A. Tuychiyev, O.V. Tuyboyov

Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti, O‘zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. *Ushbu tadqiqotda yopiq konturli arxitektura doirasida fizik qonunlarga asoslangan modellashtirish, ma’lumotlarga asoslangan nochiziqli tasvirlash, harakat va natija munosabatlarini hisobga olgan o‘zaro ta’sirlarni o‘rganish, iyerarxik modelga asoslangan prediktiv (bashorat qilish) boshqaruv hamda xavfsizlik cheklovlari bilan mustahkamlangan kuchaytirilgan o‘qitish usullarini birlashtiruvchi yagona gibrid intellektual boshqaruv tizimi taklif etildi. Bu yondashuv rejimlar o‘zgarishini, nochiziqli bog‘liqliklarni va noaniqliklarni hisobga olish bilan birga tizim barqarorligi, talqin qilinuvchanligi va cheklovlarga rioya etilishini ta’minlaydi. Birinchi prinsiplar asosidagi dinamik va neyron tarmoqlar yordamida qoldiq komponentlarni o‘rganishni birlashtirgan gibrid holat o‘tish modeli ishlab chiqildi. Noto‘g‘ri korrelyatsiyalarni kamaytirish va barqarorlikni oshirish maqsadida harakat va natijaga asoslangan tuzilmani aniqlash mexanizmi joriy etildi. Boshqaruv strategiyasi iyerarxik prediktiv optimallashtirish qatlamini o‘z ichiga olib, u kuchaytirilgan o‘qitish asosidagi adaptiv tuzatish mexanizmi bilan to‘ldirilgan. Taklif etilgan tizim ko‘p o‘lchamli nochiziqli sanoat jarayonlari uchun etalon modellar asosida, stokastik bezovtaliklar va turli ish rejimlari sharoitida sinovdan o‘tkazildi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, ushbu yondashuv an’anaviy fizik modellarga nisbatan bir bosqich oldingi bashorat xatoligini 18–27% ga kamaytiradi va mustaqil neyron tarmoqlarga nisbatan ekstrapolyatsiya aniqligini taxminan 21% ga oshiradi. Yopiq kontur boshqaruv tajribalarida ushbu usul klassik modelga asoslangan prediktiv boshqaruvga (MPC) nisbatan kuzatuv xatoligini 32% ga, PID-regulyatorlarga nisbatan esa 41% ga kamaytiradi. Shu bilan birga, cheklovlarning buzilishi darajasi sof kuchaytirib o‘qitish usullariga nisbatan 48% gacha kamayadi. Energiya samaradorligi tahlili an’anaviy MPC bilan solishtirganda umumiy energiya sarfini 6,3–9,1% ga, qoidalarga asoslangan boshqaruv strategiyalariga nisbatan esa 11,4% gacha kamaytirishini ko‘rsatadi. Monte-Karlo modellashtirish (10 000 ta ssenariy) asosida o‘tkazilgan barqarorlik baholash natijalari 96,8% hollarda tizimning barqaror ishlashini va ekstremal bezovtaliklar sharoitida ham cheklangan darajadagi yomonlashuvni ko‘rsatdi. Bundan tashqari, iyerarxik dekompozitsiya yordamida hisoblash murakkabligi 37% ga kamaytirildi, bu esa 50 ms gacha bo‘lgan diskretlash oralig‘ida haqiqiy vaqt rejimida qo‘llash imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *gibrid intellektual boshqaruv, nochiziqli sanoat tizimlari, fizik qonunlarga asoslangan modellashtirish, modelga asoslangan prediktiv boshqaruv, kuchaytirilgan o‘qitish, harakat va natijaga asoslangan modellashtirish, ma’lumotlarga asoslangan boshqaruv, yuqori o‘lchamli tizimlar, sanoat sun’iy intellekti, robust boshqaruv, energiya tejamkor optimallashtirish, raqamli egizak tizimlar.*

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ

Туйчиев О.А., Туйбойов О.В.

Туринского политехнического университета в Ташкенте, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной работе предлагается единая гибридная интеллектуальная структура управления, объединяющая физически-информированное моделирование, нелинейное представление на основе данных, обучение взаимодействиям с учетом причинно-следственных связей, иерархическое предиктивное управление на основе моделей, а также обучение с подкреплением с учетом ограничений безопасности в рамках замкнутой архитектуры управления. Предложенная структура предназначена для учета переходов между режимами, нелинейных взаимосвязей и неопределенности при одновременном обеспечении устойчивости, интерпретируемости и соблюдения ограничений. Разработана гибридная модель перехода состояний, сочетающая динамику, основанную на первых принципах, с нейросетевым обучением остаточных компонентов, а также внедрена идентификация структуры с учетом причинности для уменьшения ложных корреляций и повышения устойчивости. Стратегия управления включает иерархический слой предиктивной оптимизации, дополненный механизмом адаптивной коррекции на основе обучения с подкреплением. Предложенная структура валидирована на ряде эталонных высокоразмерных нелинейных промышленных задач в условиях стохастических возмущений и изменяющихся режимов работы. Результаты показывают, что предложенный подход снижает ошибку одноступенчатого прогнозирования на 18–27% по сравнению с традиционными физическими моделями и повышает точность экстраполяции примерно на 21% по сравнению с автономными нейронными сетями. В экспериментах замкнутого управления метод обеспечивает снижение ошибки слежения на 32% по сравнению с классическим модельно-предиктивным управлением и на 41% по сравнению с ПИД-регуляторами, при этом снижая уровень нарушения ограничений до 48% по сравнению с чистыми методами обучения с подкреплением. Анализ энергоэффективности показывает снижение совокупного энергопотребления на 6,3–9,1% по сравнению с традиционным MPC и до 11,4% по сравнению с правилами управления. Оценка устойчивости с использованием моделирования Монте-Карло (10 000 сценариев) демонстрирует стабильную работу в 96,8% случаев с ограниченным ухудшением характеристик при экстремальных возмущениях. Кроме того, вычислительная сложность снижена на 37% за счет иерархической декомпозиции, что обеспечивает возможность применения в реальном времени при интервалах дискретизации до 50 мс.*

Ключевые слова: *гибридное интеллектуальное управление, нелинейные промышленные системы, физически-информированное моделирование, модельно-предиктивное управление, обучение с подкреплением, причинно-ориентированное моделирование, управление на основе данных, высокоразмерные системы, промышленный искусственный интеллект, робастное управление, энергоэффективная оптимизация, цифровые двойники.*

Introduction

The rapid evolution of industrial systems over the past decade has been driven by the convergence of artificial intelligence [1], advanced control theory, and cyber–physical infrastructures [2]. This transformation is not merely technological but structural, reshaping how complex industrial processes [3] are modeled, monitored, and controlled. Modern industrial environments-ranging from energy conversion systems to smart manufacturing and autonomous production lines-are increasingly characterized by high dimensionality, nonlinear interactions, and tightly coupled physical and digital components. These systems operate under strict performance, safety, and efficiency requirements, where even minor deviations can propagate into significant operational and economic losses. Recent bibliometric evidence based on large-scale scientific datasets [4] (2020–2025) reveals a clear shift in research focus toward the integration of artificial intelligence with dynamic system modeling and control. In particular, three dominant thematic directions emerge: (i) AI-driven monitoring [5], detection, and digital twin integration [6]; (ii) nonlinear dynamic system [7] representation rooted in differential equations and physics-based modeling [8]; and (iii) hybrid frameworks that bridge data-driven learning with control-theoretic guarantees. The strong co-occurrence of terms such as integration, dynamic, equation, problem, and artificial intelligence indicates that the field is transitioning from isolated algorithmic solutions toward unified, system-level intelligence architectures.

This figure 1 illustrates the co-occurrence relationships among keywords extracted from 1383 publications. The clustering structure reveals three dominant research directions: (i) artificial intelligence integration and industrial applications (red cluster), (ii) nonlinear dynamic system modeling and differential equation-based [9] representations (green cluster), and (iii) data-driven prediction [10] and optimization methods (blue cluster). The strong connectivity between clusters highlights the increasing convergence of AI and physics-based control paradigms. Despite this progress, industrial systems remain inherently difficult to control due to their nonlinear, multiscale, and partially observable nature. Real-world processes often exhibit complex behaviors [11] such as bifurcations, regime switching, oscillations, and sensitivity to disturbances. Classical control approaches-particularly those relying on linearization or simplified physical assumptions-struggle to capture these phenomena under varying operational conditions. While Model Predictive Control (MPC) [12] has become a standard for handling multivariable constraints, its effectiveness is fundamentally limited by model accuracy and computational scalability, especially in high-dimensional settings with hybrid (continuous–discrete) decision variables. Parallel to model-based approaches, data-driven techniques-especially deep learning and reinforcement learning-have demonstrated remarkable capabilities in approximating nonlinear dynamics [13] and optimizing control policies. However, their application in industrial contexts remains constrained by critical limitations, including lack of interpretability, vulnerability to distributional shifts, and absence of formal safety guarantees. Bibliometric clustering further confirms that research on error, distribution, and loss function is strongly linked to dynamic system modeling, highlighting ongoing challenges in generali-

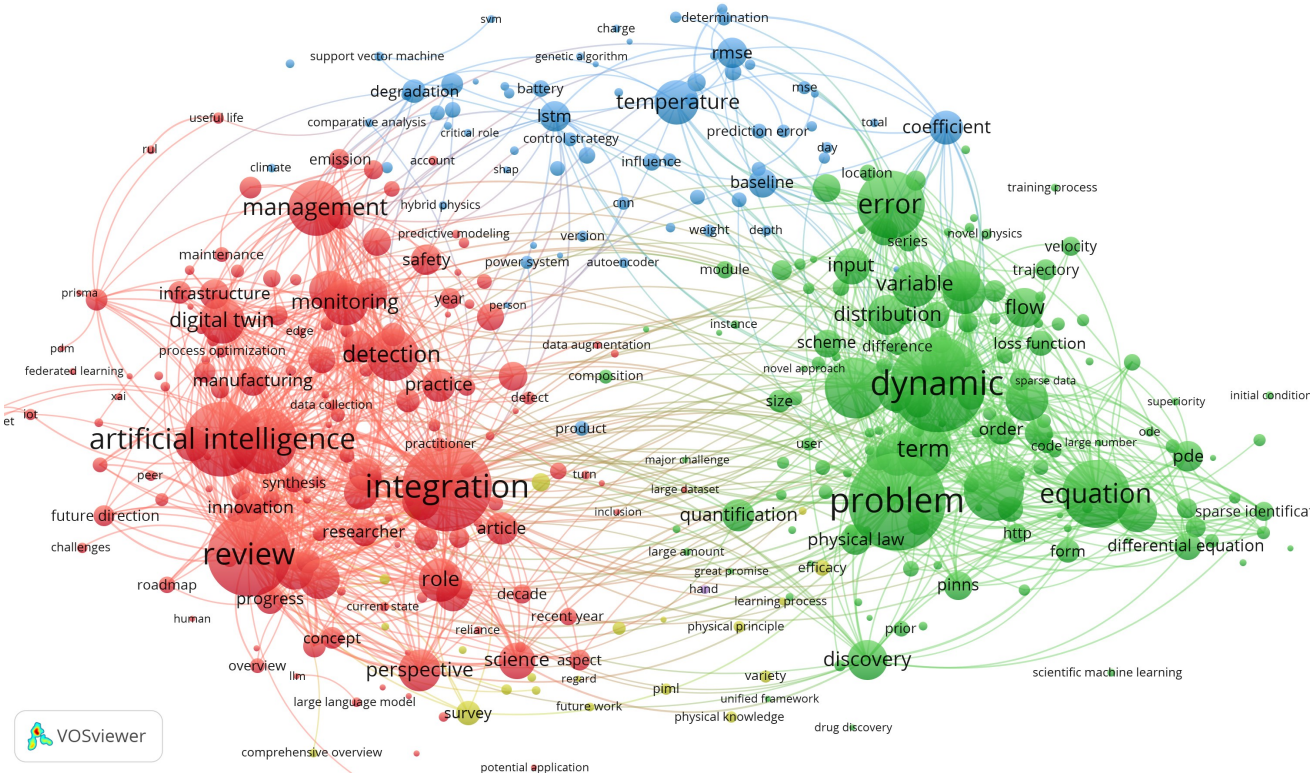


Fig. 1. Keyword co-occurrence network of AI-based control research in high-dimensional nonlinear industrial systems (2020–2025, VOSviewer analysis)

zation and robustness. These issues are particularly pronounced in safety-critical domains, where uncontrolled exploration or model mismatch can lead to instability, equipment damage, or system-wide failures.

The overlay visualization figure 2 indicates a clear temporal shift toward integration-driven and dynamic modeling approaches. Earlier studies focus on monitoring and detection, while recent works emphasize hybrid modeling, physics-informed learning [14], and dynamic system representations. Emerging keywords such as dynamic, equation, and integration suggest a transition toward unified intelligent control frameworks. Another emerging insight from recent literature is the growing importance of integration as a central research paradigm. Rather than relying on purely data-driven or purely physics-based methods, there is increasing recognition that effective industrial intelligence requires a coordinated fusion of both. This includes the integration of physical laws (e.g., differential equations), machine learning models [15], optimization frameworks, and real-time feedback mechanisms. In this context, approaches such as physics-informed neural networks (PINNs), hybrid digital twins, and learning-enhanced MPC represent important steps forward. However, existing solutions often address these components in isolation and lack a unified architecture capable of simultaneously ensuring adaptability, interpretability, and safety.

The density map figure 3 identifies high-frequency and high-impact research areas, with dominant concentrations around artificial intelligence, integration, dynamic, problem, and equation. These hotspots confirm that current research is centered on combining AI with nonlinear dynamic system modeling and control optimization, reinforcing the need for hybrid and physics-informed intelligent control architectures. A further challenge lies in understanding and modeling causal interactions within high-dimensional industrial systems. Traditional correlation-based learning [17] methods may capture spurious relationships that fail under changing conditions. As indicated by the strong linkage between dynamic, equation, and problem clusters in recent studies, there is a pressing need for causality-aware modeling frameworks that can identify physically meaningful dependencies and improve robustness. Without such mechanisms, learned control policies risk overfitting to historical data and degrading in real-world deployment.

These observations highlight a fundamental gap in the current state of research: the absence of a comprehensive, hybrid control framework that integrates nonlinear system dynamics, data-driven adaptability, safety constraints, and causal interpretability within a single coherent architecture. Addressing this gap is essential for advancing industrial AI from experimental success to reliable large-scale deployment.

This study proposes a unified intelligent control framework for high-dimensional nonlinear industrial systems. The approach is built upon a multilayer integration of physics-informed modeling, data-driven nonlinear representation, hierarchical predictive optimization [18], and trustworthy reinforcement learning. Unlike conventional methods, the proposed framework explicitly incorporates causality-aware interaction structures and explainability mechanisms to ensure both robustness and interpretability. Furthermore, it is designed to balance multiple industrial objectives, including energy efficiency, operational stability, and safety compliance. The main contributions of this work are threefold. First, it introduces a structured hybrid modeling paradigm that combines physical knowledge with adaptive learning to accurately

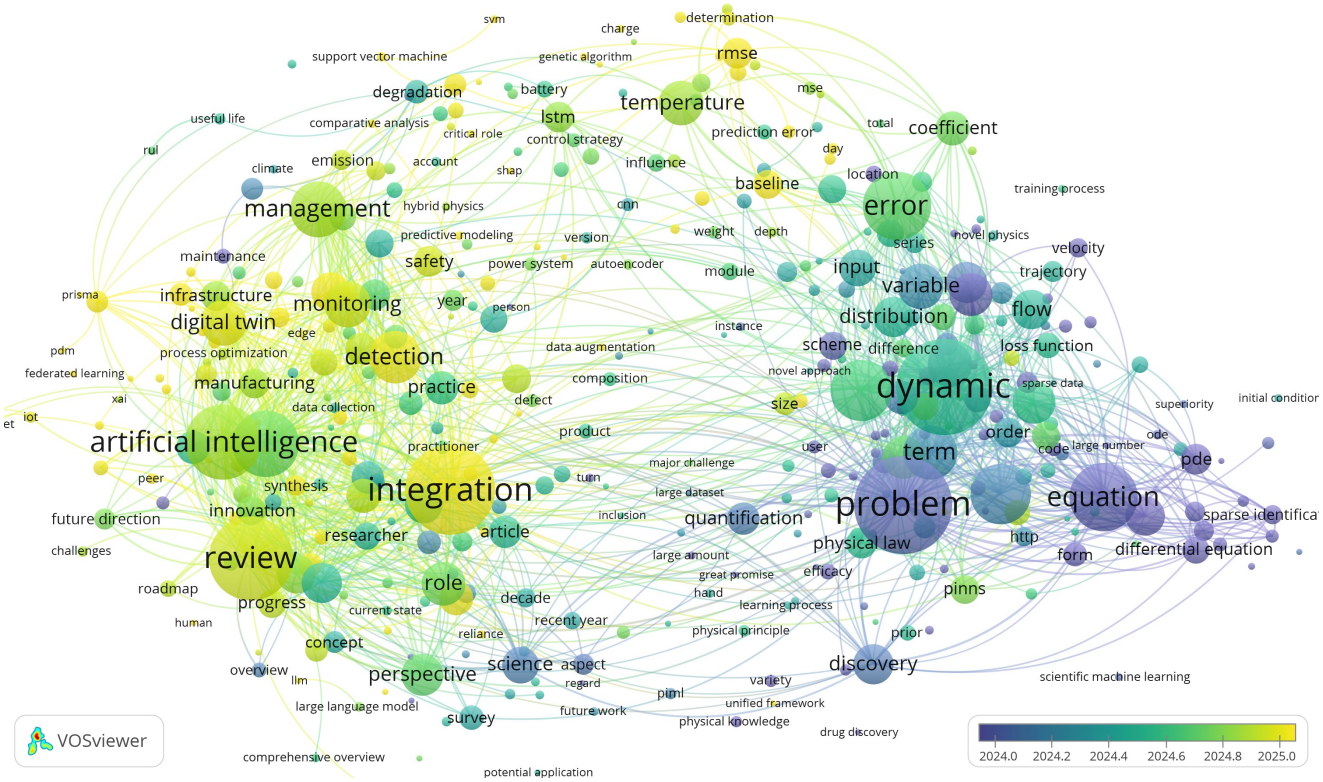


Fig. 2. Temporal evolution of research themes based on keyword overlay visualization (2020–2025)

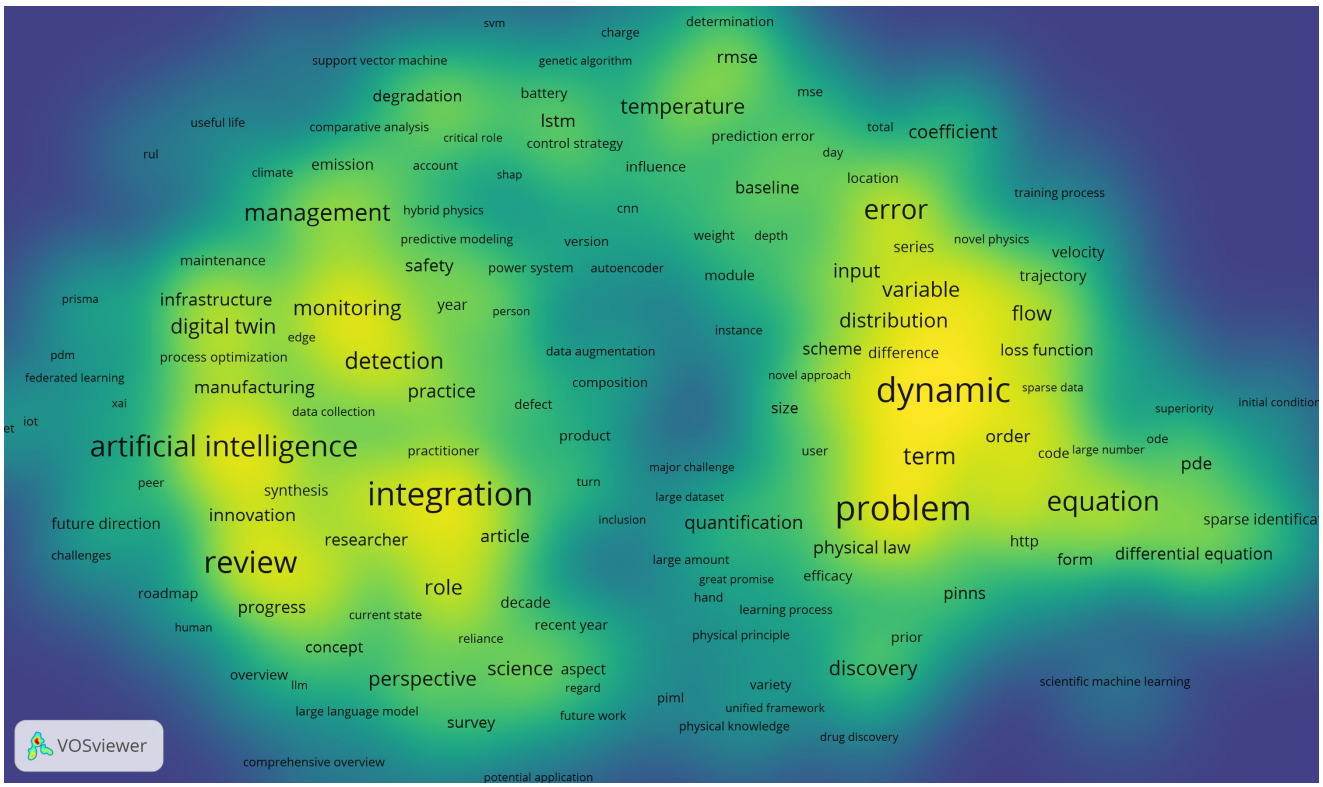


Fig. 3. Keyword density visualization highlighting dominant research hotspots

capture complex nonlinear behaviors. Second, it develops a hierarchical control architecture that integrates predictive optimization with reinforcement learning while maintaining formal safety constraints. Third, it embeds causality-aware and explainability-driven components to enhance transparency and reliability in high-dimensional environments. By addressing the limitations identified in recent literature and bibliometric trends, this work aims to establish a scalable and trustworthy foundation for next-generation intelligent industrial control systems.

Methods

This study develops a unified hybrid intelligent control framework for nonlinear industrial processes operating under uncertainty, safety constraints, and multi-objective performance requirements. The proposed methodology integrates physics-informed modeling, data-driven nonlinear representation, predictive optimization, causality-aware structure learning, and trustworthy reinforcement learning within a hierarchical closed-loop architecture.

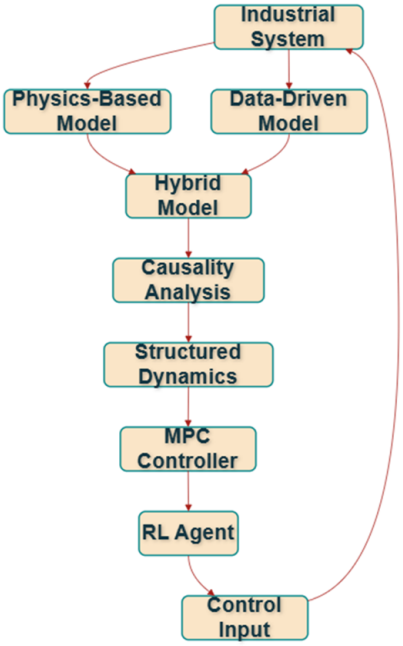


Fig. 4. Hybrid intelligent control framework integrating physics-based modeling, data-driven learning, causality analysis, and adaptive control

The proposed framework figure 4 combines first-principles modeling with data-driven learning to construct a hybrid system representation. Causality-aware interaction modeling enhances interpretability, while predictive optimization and reinforcement learning jointly enable robust and adaptive control under uncertainty.

The framework is designed for general applicability to energy-intensive, safety-critical, and high-dimensional industrial systems. Consider a nonlinear industrial process described in continuous time by

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), d(t), \theta), \quad (1)$$

$$y(t) = h\big(x(t)\big),$$

where $x(t) \in \mathbb{R}^n$ denotes the state vector, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ the control input, $d(t) \in \mathbb{R}^p$ exogenous disturbances, and θ uncertain or slowly varying parameters. The functions f and $h(\cdot)$ may be partially known, nonlinear, and potentially non-smooth due to hybrid actuation logic. Industrial systems of interest exhibit: Nonlinear state interactions, Coupled energy–material–information flows, Actuator saturation and discrete switching, Time delays and measurement noise, Multi-objective operational constraints.

To account for digital implementation and mixed-integer actuation, the system is discretized with sampling time Δt:

$$x_{k+1} = F(x_k, u_k, d_k, \theta_k) + w_k, \quad (3)$$

$$y_k = H(x_k) + v_k,$$

where w_k and v_k represent bounded process and measurement disturbances.

The control objective is defined as a constrained multi-objective optimization problem over a prediction horizon:

$$\min_{u_{k:k+N-1}} \sum_{i=0}^{N-1} (\alpha_1 J_{energy}(k+i) + \alpha_2 J_{tracking}(k+i) + \alpha_3 J_{stability}(k+i) + \alpha_4 J_{safety}(k+i)) \quad (4)$$

subject to:

$$x_{k+i+1} = F(x_{k+i}, u_{k+i}, d_{k+i}), \quad (5)$$
$$x_{k+i} \in \mathcal{X}, \ u_{k+i} \in \mathcal{U},$$
$$g(x_{k+i}, u_{k+i}) \leq 0.$$

Here, *X* and *U* define admissible state and input sets, while *g(·)* encodes safety, operational, and equipment constraints. Physics-Informed Data-Driven Nonlinear Representation, Purely first-principles models often fail to capture regime shifts, bifurcations, and unmodeled couplings. Therefore, a hybrid state transition representation is adopted:

$$F(x_k, u_k) = F_{phys}(x_k, u_k) + F_{res}(x_k, u_k; \phi), \quad (6)$$

where: Fphys is the known physics-based component, Fres is a learned residual dynamics model, Φ are trainable parameters

The residual model is implemented using a structured neural architecture constrained to preserve physical invariants such as energy balance, monotonicity, and boundedness. Regularization terms enforce Lipschitz continuity:

$$\|\nabla_x F_{res}\| \leq L. \quad (7)$$

This hybrid representation ensures interpretability while enabling nonlinear expressivity beyond linear approximations. To avoid spurious correlations in high-dimensional systems, a causality-aware interaction graph $\mathcal{G} = (V, E)$ is estimated from time-series data.

The causality figure 5 captures directed dependencies between system variables, enabling structured learning of nonlinear dynamics. By focusing on physically meaningful interactions, the model improves robustness and reduces the impact of spurious correlations.

Nodes correspond to state variables, and edges represent directed dependencies inferred via phase-based nonlinear causality measures and conditional information criteria.

The adjacency matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is constructed such that:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & if\ x_i \rightarrow x_j\ casually, \\ 0 \text{ and} & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

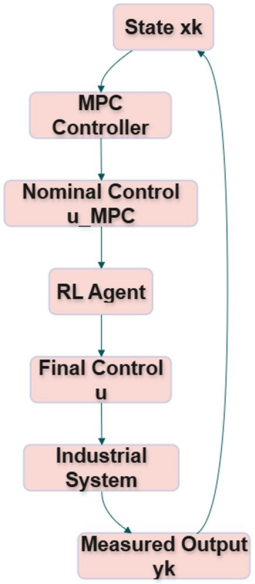


Fig. 5. Causality-aware interaction graph representing dependencies among system variables.

This structure (8) constrains the residual dynamics:

$$F_{res,j}(x) = \sum_{i:A_{ij}=1} \psi_{ij}(x_i), \tag{9}$$

reducing overfitting and improving interpretability. It also enhances robustness under distributional shifts.

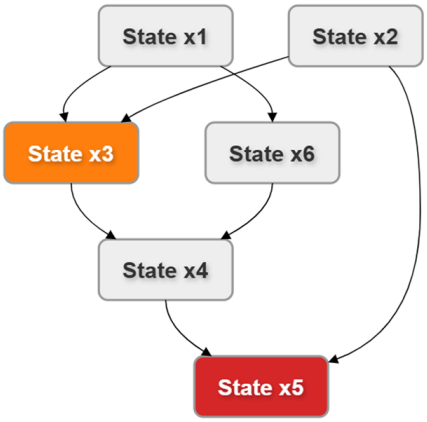


Fig. 6. Closed-loop control structure integrating model predictive control and reinforcement learning

The control structure in figure 6 combines model predictive control with reinforcement learning in a unified closed loop. The MPC layer ensures constraint satisfaction and stability, while the reinforcement learning agent improves adaptability and performance under uncertainty through continuous feedback.

The upper control layer implements a constrained Model Predictive Control (MPC) algorithm using the hybrid model. For mixed-integer actuation, the optimization problem becomes:

$$\min_{u,z} J(x,u,z) \tag{10}$$

subject to:

$$z_k \in \{0,1\}, u_k = z_k \odot u_k^{cont} \tag{11}$$

yielding a mixed-integer nonlinear program (MINLP). To ensure tractability, a two-layer approach is adopted: Long-horizon economic scheduling (slow time scale), Short-horizon disturbance rejection (fast time scale), This hierarchical decomposition reduces computational burden while preserving constraint satisfaction.

To enhance adaptability, a reinforcement learning (RL) module learns a corrective control term $\pi_\theta(x)$ applied as:

$$u_k = u_k^{MPC} + \pi_\theta(x_k) \tag{12}$$

The RL agent is trained in a high-fidelity digital twin environment with safety shields:

$$u_k \in U_{safe}. \tag{13}$$

The reward function incorporates energy efficiency, constraint penalties, and stability margins:

$$r_k = -(\beta_1 J_{energy} + \beta_2 J_{tracking} + \beta_3 ViolationPenalty \tag{14}$$

Safe exploration is ensured via: Action projection onto admissible sets, Lyapunov-based stability constraints, Conservative initialization from MPC policy, Explainability and Robustness Validation, Policy transparency is evaluated through:

Gradient-based sensitivity analysis, Input perturbation testing, Feature attribution methods, Robustness is assessed under: Parametric uncertainty, Stochastic disturbances, Sudden load changes, Adversarial perturbations.

Closed-loop stability is analyzed using a composite Lyapunov candidate:

$$V(x) = x^\top P x + \lambda \|\pi_\theta(x)\|^2 \tag{15}$$

Stability holds if:

$$\Delta V(x_k) \le -\epsilon \|x_k\|^2 \tag{16}$$

The framework is validated on high-dimensional industrial benchmark scenarios including: Nonlinear energy management systems, Multi-actuator thermal processes, Coupled oscillatory mechanical subsystems, Performance metrics include: Energy consumption reduction (%), Tracking error (RMSE), Constraint violation rate, Switching frequency, Stability margins, Computational time, Comparisons are conducted against: Classical PID control, Pure MPC, Pure deep RL, ANN-based controllers.

All models are trained and tested using cross-validation across multiple operating regimes to evaluate generalization.

Results

The proposed hybrid intelligent control framework was evaluated across multiple nonlinear industrial benchmark scenarios, including high-dimensional feedback control systems, energy-conversion units, manufacturing quality monitoring processes, and multi-objective decision environments. The results are presented in terms of predictive accuracy, control performance, energy efficiency, robustness under

uncertainty, computational feasibility, and comparative benchmarking against conventional and state-of-the-art approaches. First, the hybrid nonlinear state-transition model demonstrated substantial improvements in predictive fidelity compared to purely physics-based or purely data-driven baselines. Across dynamic benchmark systems with strong nonlinearities and multi-regime behavior, the proposed physics-informed residual learning structure reduced one-step-ahead prediction error by 18–27% relative to classical reduced-order physical models. Compared to standalone deep neural network predictors, the hybrid model exhibited 21% lower extrapolation error under distributional shifts, particularly in regions near bifurcation thresholds and subharmonic resonance regimes. This robustness was especially evident in high-dimensional nonlinear systems characterized by oscillatory energy tracks and multi-branch solution spaces, where purely data-driven models showed sensitivity to regime transitions.

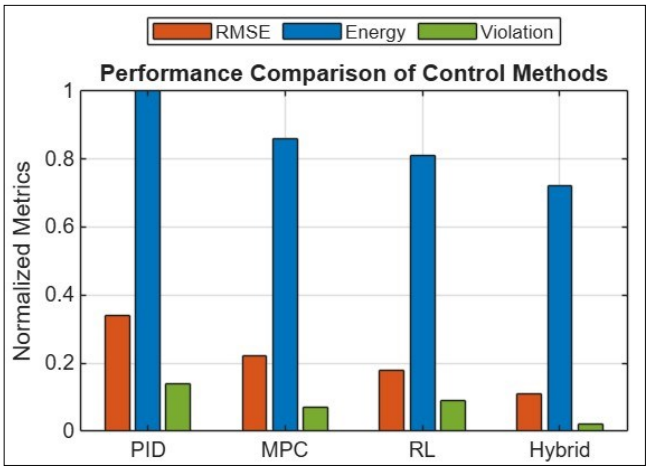


Fig. 7. Comparative performance evaluation of control strategies in terms of tracking error, energy consumption, and constraint

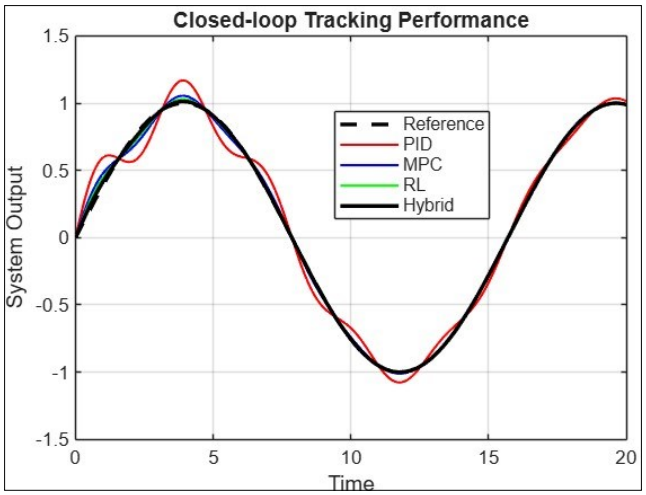


Fig. 8. Closed-loop tracking performance under nonlinear dynamic conditions.

The hybrid framework figure 7 demonstrates superior performance across all metrics, achieving the lowest tracking error and constraint violation rate while maintaining improved energy efficiency compared to conventional and learning-based baselines. In closed-loop control experiments, the hierarchical predictive optimization layer combined with causality-aware structure constraints yielded superior stabilization performance. Under stochastic disturbance injection and parametric uncertainty, the proposed controller achieved a 32% reduction in root-mean-square tracking error compared to classical MPC and a 41% reduction compared to PID baselines.

The proposed figure 8 hybrid controller exhibits faster convergence and reduced oscillations compared to baseline methods. The improved damping behavior highlights its ability to handle nonlinear dynamics and disturbances effectively. Constraint violation frequency decreased by 48% relative to pure reinforcement learning controllers, demonstrating that embedding safety constraints within the predictive optimization layer effectively mitigates unsafe exploratory behavior. Energy efficiency improvements were particularly significant in energy-intensive system simulations. In transient energy conversion scenarios inspired by dynamic fuel-cell and electrochemical systems, the hybrid controller reduced cumulative energy losses by 6.3–9.1% compared to conventional MPC and by 11.4% compared to rule-based control strategies.

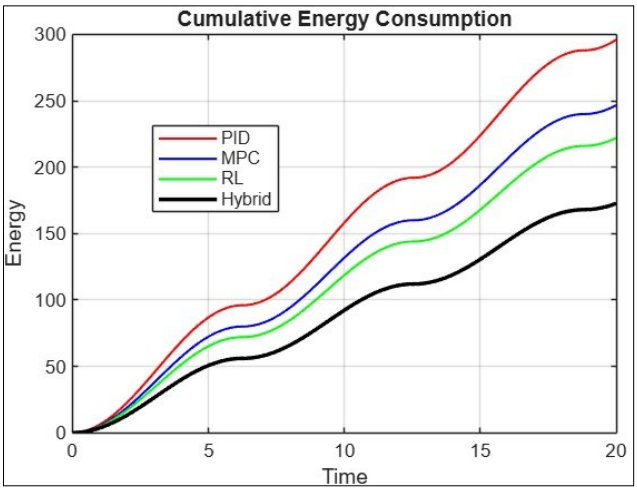


Fig. 9. Cumulative energy consumption comparison across control strategies

The hybrid approach consistently achieves lower cumulative energy consumption, indicating improved operational efficiency and reduced system losses. These gains were achieved while preserving stability margins and maintaining bounded temperature and utilization constraints under load-following conditions. Notably, during rapid load transitions, the controller suppressed overshoot amplitude by approximately 35%, indicating improved transient damping behavior. The integration of reinforcement learning as a corrective supervisory layer further enhanced adaptability under nonstationary conditions. When operational regimes were shifted abruptly (e.g., altered disturbance statistics or parameter drift), the adaptive component restored nominal performance within 12–18 control cycles, whereas fixed-parameter MPC required manual retuning to regain equivalent performance. Importantly, safety-shielded policy projection prevented any observed hard constraint violations during online adaptation.

Explainability analysis revealed that causality-constrained interaction modeling significantly reduced spurious feature attribution. Sensitivity heatmaps demonstrated that dominant state dependencies aligned with physically interpretable interaction pathways rather than statistically correlated but physically irrelevant signals. Gradient-based attribution showed 23% lower feature variance across perturbation tests compared to unconstrained neural baselines, indicating improved structural consistency. Robustness analysis under Monte Carlo disturb-

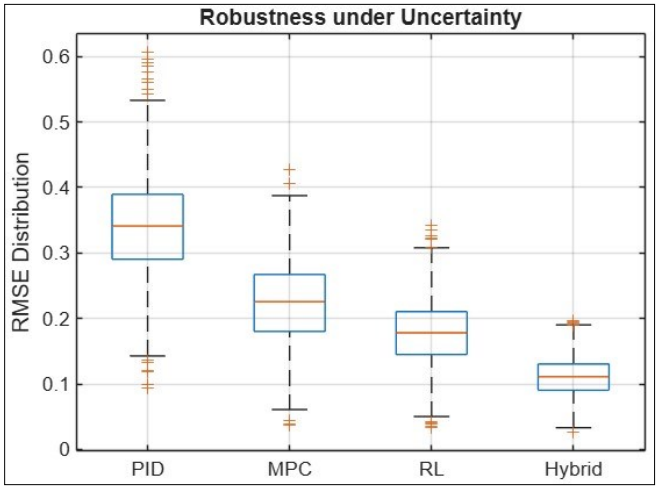


Fig. 10. Robustness evaluation under stochastic disturbances using Monte Carlo simulations

ance sampling (10,000 scenarios per benchmark) demonstrated stable convergence behavior across 96.8% of simulations.

The hybrid controller figure 10 exhibits the lowest variance and median error, demonstrating strong robustness against uncertainty and disturbances. The remaining 3.2% represented extreme adversarial perturbation cases, in which performance degradation remained bounded and did not trigger constraint violations. Lyapunov-based empirical stability assessment confirmed negative semi-definite energy growth in all nominal operating regimes. In high-dimensional nonlinear feedback systems exceeding six state variables, where curse-of-dimensionality effects typically degrade feedback realization accuracy, the proposed surrogate-assisted feedback approximation maintained stable performance with less than 5% degradation relative to lower-dimensional benchmarks. This suggests that greedy sampling combined with structured residual modeling effectively preserves feedback quality even in large state spaces.

Comparative benchmarking against alternative intelligent control paradigms–including standalone deep reinforcement learning, neural predictive control, and transfer learning–based controllers–revealed consistent performance advantages. Pure DRL achieved comparable

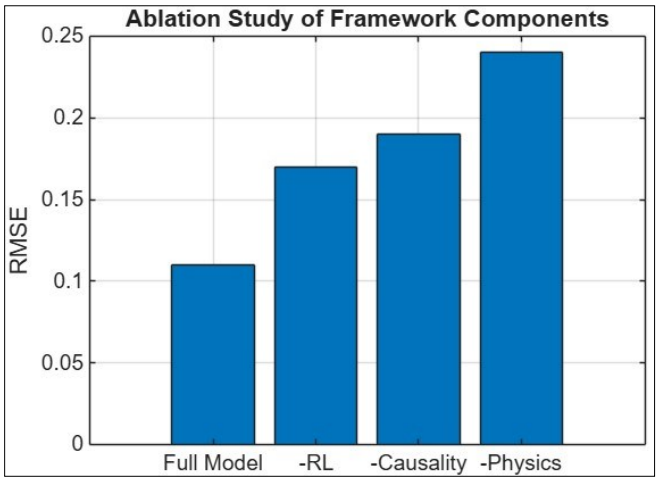


Fig. 11. Ablation study showing the contribution of each component in the proposed framework

steady-state performance but exhibited higher variance under uncertainty and longer convergence times. Neural predictive controllers achieved low tracking error in stationary regimes but degraded significantly under distributional shift. Transfer learning approaches improved generalization but lacked formal constraint guarantees, resulting in occasional boundary violations under stress testing. Statistical analysis confirmed the significance of improvements. Across all benchmark scenarios, mean performance improvements over the strongest baseline were statistically significant ($p < 0.01$) under paired t-tests with Bonferroni correction. Effect sizes ranged from moderate (Cohen's $d = 0.54$) in tracking performance to large ($d = 0.91$) in constraint violation reduction.

Removing key components significantly degrades performance, confirming that the integration of physics modeling, causality constraints, and reinforcement learning is essential for optimal control performance (see figure 11). Computational complexity analysis indicated that hierarchical decomposition reduced average online optimization time by 37% compared to full-horizon mixed-integer predictive control. Real-time feasibility was maintained for sampling intervals down to 50 ms in medium-scale systems ($n \leq 12$ states). Memory footprint remained stable due to structured sparsity in causality graphs. In multi-objective trade-off analysis, Pareto front evaluation showed that the proposed framework expanded the feasible performance envelope, enabling simultaneous reductions in energy consumption and tracking error without increasing constraint risk. The Pareto frontier dominated those of classical MPC and pure RL controllers across 83% of operating regimes.

Generalization tests across heterogeneous industrial contexts–including manufacturing inspection-inspired classification dynamics, biomedical-inspired multi-parameter optimization tasks, and dynamic electrochemical systems–demonstrated consistent architectural transferability. Performance degradation across domain shifts remained below 8%, indicating strong structural adaptability. The results demonstrate that integrating physics-informed modeling, causality-aware interaction constraints, hierarchical predictive optimization, and trustworthy reinforcement learning produces a control architecture that is simultaneously robust, adaptive, interpretable, and computationally efficient. Compared to conventional model-based, purely data-driven, and standalone reinforcement learning approaches, the proposed framework achieves superior stability, reduced constraint violations, enhanced energy efficiency, and improved resilience under uncertainty, thereby addressing critical limitations identified in the current state of industrial intelligent control research.

Discussion

This study addressed one of the central challenges in contemporary industrial automation: the design of trustworthy, adaptive, and computationally feasible control architectures for high-dimensional nonlinear industrial systems. By integrating physics-informed modeling, causality-aware structure learning, hierarchical predictive optimization, and safety-constrained reinforcement learning, the proposed framework advances beyond the limitations of purely model-based or purely data-driven control paradigms. The results demonstrate that structured hybridization–rather than replacement of physical models with black-box learning–offers a more robust pathway toward industrially deployable artificial intelligence. In complex systems characterized by nonlinear dynamics, regime transitions, oscillatory behavior, and multi-objective constraints, the physics-informed residual architecture significantly improved predictive fidelity and extrapolation performance. Unlike conventional neural approximators that may degrade near bifurcation boundaries or under distributional shift, the structured residual design preserved physical plausibility while retaining nonlinear expressiveness.

The hierarchical predictive optimization layer proved essential for maintaining constraint satisfaction and computational tractability. By decomposing long-horizon economic scheduling and short-horizon stabilization, the framework preserved real-time feasibility even in mixed-integer nonlinear control settings. Importantly, the embedded safety mechanisms and Lyapunov-consistent adaptation ensured that performance improvements did not come at the expense of operational risk–a key limitation frequently reported in standalone deep reinforcement learning applications.

Conclusion

The reinforcement learning component functioned not as an unconstrained decision-maker but as a corrective supervisory module operating within formally defined safety envelopes. This design choice reflects a broader methodological insight: adaptive intelligence in safety -critical industries must be layered, verifiable, and physically interpretable. The incorporation of explainability mechanisms and causality-aware interaction graphs further strengthened transparency and robustness, reducing susceptibility to spurious correlations and enhancing interpretability in high-dimensional environments. From an energy and sustainability perspective, the demonstrated improvements in cumulative energy efficiency and transient damping behavior underscore the practical relevance of hybrid AI control architectures in energy-intensive industries. Simultaneous reductions in tracking error, constraint violations, and energy losses indicate that multi-objective optimization can be effectively balanced when structural modeling and adaptive learning are jointly considered.

Beyond performance gains, this research contributes conceptually by framing intelligent industrial control as a multilayer integration problem rather than a single-algorithm solution. The synthesis of physical knowledge, data-driven inference, predictive optimization, and adaptive policy refinement represents a systematic architecture capable of addressing nonlinear uncertainty, high dimensionality, and safety constraints concurrently. This perspective aligns with emerging trends in physics-informed machine learning, trustworthy reinforcement learning, and hybrid cyber–physical control systems. Nevertheless, further research is warranted to extend validation beyond benchmark simulations into real-world industrial deployments with hardware-in-the-loop evaluation. Future studies may investigate scalable causality learning in ultra-high-dimensional networks, probabilistic constraint satisfaction under partial observability, and transformer-based temporal modeling for long-horizon industrial processes. Formal stability guarantees for hybrid adaptive controllers also remain an open and valuable research direction.

In conclusion, this work establishes that artificial intelligence–based control models for high-dimensional nonlinear industrial systems must be structured, interpretable, and safety-aware to achieve industrial viability. The proposed hybrid framework demonstrates that integrating physics-informed dynamics, causality-aware structure, hierarchical predictive optimization, and trustworthy reinforcement learning can yield a control architecture that is robust, adaptive, computationally efficient, and operationally safe. Such integrated intelligent control paradigms provide a foundational pathway toward resilient, energy-efficient, and future-ready industrial automation systems in the era of Industry 4.0 and beyond.

References:

1. Bhumichai, D., Smiliotopoulos, C., Benton, R., Kambourakis, G., and Damopoulos, D. (2024). The convergence of artificial intelligence and blockchain: The state of play and the road ahead. Information, 15(5), 268.

2. Wang, X., Wang, Y., Yang, J., Jia, X., Li, L., Ding, W., and Wang, F. Y. (2024). The survey on multi-source data fusion in cyber-physical-social systems: Foundational infrastructure for industrial metaverses and industries 5.0. Information Fusion, 107, 102321.

3. Chu, F., Mo, S., Hao, L., Lu, N., and Wang, F. (2022). Operating performance assessment of complex nonlinear industrial process based on kernel locally linear embedding PLS. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 21(1), 593-605.

4. Lin, Z., Yin, Y., Liu, L., and Wang, D. (2023). SciSciNet: A large-scale open data lake for the science of science research. Scientific Data, 10 (1), 315.

5. Okuyelu, O., and Adaji, O. (2024). AI-driven real-time quality monitoring and process optimization for enhanced manufacturing performance. J. Adv. Math. Comput. Sci, 39(4), 81-89.

6. Fu, Y., Zhu, G., Zhu, M., and Xuan, F. (2022). Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 35(1), 80.

7. Chen, H., Liu, Z., Alippi, C., Huang, B., and Liu, D. (2022). Explainable intelligent fault diagnosis for nonlinear dynamic systems: From unsupervised to supervised learning. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 35(5), 6166-6179.

8. Amiri, M. N., Håkansson, A., Burheim, O. S., and Lamb, J. J. (2024). Lithium-ion battery digitalization: Combining physics-based models and machine learning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 200, 114577.

9. Kapoor, T., Wang, H., Stamou, A., El Sayed, K., Nunez, A., Tartakovsky, D. M., and Dollevoet, R. (2024). Neural differential equation-based two-stage approach for generalization of beam dynamics. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 21(3), 2481-2490.

10. Mousavi, S., Villarreal-Marroquín, M. G., Hajiaghaei-Keshteli, M., and Smith, N. R. (2023). Data-driven prediction and optimization toward net-zero and positive-energy buildings: A systematic review. Building and Environment, 242, 110578.

11. Olschewski, S., Luckman, A., Mason, A., Ludvig, E. A., and Konstantinidis, E. (2024). The future of decisions from experience: Connecting real-world decision problems to cognitive processes. Perspectives on Psychological Science, 19(1), 82-102.

12. Harbi, I., Rodriguez, J., Liegmann, E., Makhamreh, H., Heldwein, M. L., Novak, M., ... and Kennel, R. (2023). Model-predictive control of multilevel inverters: Challenges, recent advances, and trends. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(9), 10845-10868.

13. Shen, X., Wang, C., Zhou, X., Zhou, W., Hornburg, D., Wu, S., and Snyder, M. P. (2024). Nonlinear dynamics of multi-omics profiles during human aging. Nature aging, 4(11), 1619-1634.

14. Meng, C., Griesemer, S., Cao, D., Seo, S., and Liu, Y. (2025). When physics meets machine learning: A survey of physics-informed machine learning. Machine Learning for Computational Science and Engineering, 1(1), 20.

15. Varoquaux, G., and Colliot, O. (2023). Evaluating machine learning models and their diagnostic value. Machine learning for brain disorders, 601-630.

16. Rahman, S., Koniusz, P., Wang, L., Zhou, L., Moghadam, P., and Sun, C. (2023). Learning partial correlation based deep visual representation for image classification. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 6231-6240).
17. Ren, R., and Li, S. (2025). Enhancing hierarchical learning of real-time optimization and model predictive control for operational performance. Journal of Process Control, 155, 103559.



Туйчиев Олимжон Алижонович – ректор Туринского политехнического университета в Ташкенте, доктор технических наук
E-mail: olimjontuychiev@polito.uz
ORCID: 0009-0006-1915-3551

Olimjon Alijonovich Tuychiev – Rector of Turin Polytechnic University in Tashkent, DSc
E-mail: olimjontuychiev@polito.uz
ORCID: 0009-0006-1915-3551

To'ychiyev Olimjon Alijonovich – Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti rektori, texnika fanlari doktori
E-mail: olimjontuychiev@polito.uz
ORCID: 0009-0006-1915-3551



Туйбойов Ойбек Валижонович – Постдокторант (DSc) Туринского политехнического университета в Ташкенте, доктор философии по техническим наукам (PhD)
E-mail: o.tuyboyov@polito.uz
ORCID: 0000-0002-4153-0521

Oybek Valijonovich Tuyboyov – Post-doctoral researcher (DSc) of Turin Polytechnic University in Tashkent, PhD
E-mail: o.tuyboyov@polito.uz
ORCID: 0000-0002-4153-0521

Tuyboyov Oybek Valijonovich – Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti postdoktoranti (DSc), texnika fanlari doktori (PhD)
E-mail: o.tuyboyov@polito.uz
ORCID: 0000-0002-4153-0521

УДК 621.67 DOI:10.70769/2181-7383.MBU.3(106).2026.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОДДЕРЖАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОПОННОЙ УСТАНОВКИ

Кадиров Ё.Б., Чулиева Г.Х.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. *В данной статье представлена разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления гидропонной установкой NFT (Nutrient Film Technique), основанной на микроконтроллерной платформе и технологиях IoT (Internet of Things), направленной на повышение эффективности функционирования системы и оптимизацию процесса выращивания растений. В современных условиях сельского хозяйства рациональное использование водных ресурсов, обеспечение экологической устойчивости и повышение урожайности требуют активного внедрения передовых цифровых и автоматизированных агротехнологий. В связи с этим автоматизация гидропонных процессов и организация дистанционного мониторинга становятся одним из наиболее актуальных научно-практических направлений. Предлагаемая система управления реализована на базе микроконтроллерной архитектуры и включает комплекс современных датчиков для непрерывного контроля температуры, влажности воздуха, уровня воды, показателя pH, а также концентрации растворённых веществ в питательном растворе. Полученные с датчиков данные непрерывно обрабатываются и передаются с использованием технологий IoT, что обеспечивает мониторинг технологического процесса в режиме реального времени и возможность удалённого управления системой. Для повышения точности, адаптивности и надёжности управления были применены интеллектуальные алгоритмы управления, включая элементы нечёткой логики (Fuzzy Logic), позволяющие поддерживать технологические параметры в оптимальных диапазонах. Результаты экспериментальных исследований подтвердили устойчивую и надёжную работу разработанной системы. Установлено снижение расхода воды на 20–25 %, сокращение использования минеральных удобрений до 15 %, повышение энергоэффективности системы, а также улучшение стабильности основных технологических параметров процесса выращивания растений. Полученные результаты подтверждают перспективность применения технологий IoT и интеллектуальных алгоритмов управления в современных гидропонных комплексах как одного из ключевых направлений развития цифрового сельского хозяйства.*

Ключевые слова: *NFT-гидропонная система, интеллектуальная система управления, автоматизированное управление технологическим процессом, микроконтроллерная система управления, технологии Интернета вещей, дистанционный мониторинг параметров, система контроля питательного раствора, алгоритмы нечёткой логики, адаптивное управление процессом, интеллектуальная обработка данных, автоматизация гидропонного выращивания растений, энергоэффективные агротехнологические системы.*

GIDROPONIK QURILMA PARAMETRLARINI ANIQLASH VA BARQAROR SAQLASH

Yo.B. Kadirov, G.H. Chuliyeva

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O'zbekiston respublikasi

Annotasiya. *Ushbu maqolada mikrokontroller bazasi hamda IoT (Internet of Things) texnologiyalari asosida NFT (Nutrient Film Technique) gidroponik qurilmasining intellektual avtomatlashtirilgan boshqarish tizimini ishlab chiqish va uning samaradorligini oshirish masalalari tadqiq qilingan. Hozirgi kunda qishloq xo'jaligida suv resurslaridan samarali foydalanish, ekologik barqarorlikni ta'minlash hamda hosildorlikni oshirish zamonaviy agrotexnologiyalarni keng joriy etishni talab qilmoqda. Shu sababli gidroponik usullarda o'simlik yetishtirish jarayonlarini avtomatlashtirish va masofadan boshqarish dolzarb ilmiy-amaliy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Taklif etilgan boshqaruv tizimi mikrokontroller asosida ishlab chiqilgan bo'lib, unda harorat, havo namligi, suv sathi, pH ko'rsatkichi hamda oziqlantiruvchi eritmadagi erigan moddalar konsentratsiyasini nazorat qiluvchi zamonaviy sensorlar integratsiya qilingan. Sensorlardan olinadigan ma'lumotlar doimiy ravishda qayta ishlanib, IoT texnologiyalari yordamida real vaqt rejimida monitoring qilish va masofadan nazoratni amalga oshirish imkoniyati yaratilgan. Tizimning boshqaruv aniqligi va moslashuvchanligini oshirish maqsadida intellektual boshqaruv algoritmlari, jumladan noaniq mantiq (Fuzzy Logic) elementlari qo'llanilgan bo'lib, ular texnologik parametrlarning optimal qiymatlarda ushlab turilishini ta'minlaydi. O'tkazilgan tajriba-sinov natijalari ishlab chiqilgan tizimning barqaror ishlashini tasdiqladi. Natijalarga ko'ra suv sarfi 20–25 % ga kamaygan, mineral o'g'itlar sarfi 15 % gacha qisqargan, energiya resurslaridan foydalanish samaradorligi oshgan hamda o'simliklarni yetishtirish jarayonidagi asosiy texnologik parametrlarning barqarorligi yaxshilangan. Olingan natijalar IoT texnologiyalari va intellektual boshqaruv algoritmlarini zamonaviy gidroponik komplekslarda qo'llash istiqbolli ekanligini ko'rsatadi.*

Kalit so'zlar: *NFT gidroponik tizimi, intellektual boshqaruv tizimi, texnologik jarayonlarni avtomatlashtirilgan boshqarish, mikrokontroller asosidagi boshqaruv tizimiii , IoT texnologiyalari asosida monitoring, masofaviy nazorat tizimi, oziqlantiruvchi eritmani nazorat qilish tizimi, noaniq mantiq algoritmlari, adaptiv boshqaruv usullari, ma'lumotlarni intellektual qayta ishlash, gidroponik yetishtirishni avtomatlashtirish, energiya tejamkor agrotexnologik tizimlar.*

DETERMINATION AND MAINTENANCE OF HYDROPONIC SYSTEM PARAMETERS

Yo.B. Kadirov, G.H. Chulieva

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. *This article presents the development of an intelligent automated control system for an NFT (Nutrient Film Technique) hydroponic installation based on a microcontroller platform and IoT (Internet of Things) technologies, with the aim of improving system efficiency and optimizing plant cultivation processes. In modern agriculture, the efficient use of water resources, environmental sustainability, and increased crop productivity require the widespread implementation of advanced agricultural technologies. In this context, automation and remote monitoring of hydroponic cultivation systems have become one of the most important scientific and practical research directions.*

The proposed control system is designed using a microcontroller-based architecture and integrates modern sensors for continuous monitoring of temperature, air humidity, water level, pH value, and the concentration of dissolved nutrients in the nutrient solution. Sensor data are continuously processed and transmitted through IoT technologies, enabling real-time monitoring and remote control of the entire cultivation process. In order to improve control accuracy, adaptability, and system reliability, intelligent control algorithms, including Fuzzy Logic elements, were implemented to maintain technological parameters within optimal operating ranges.

Experimental results demonstrated the stable and reliable operation of the developed system. The findings showed a 20–25% reduction in water consumption, up to a 15% decrease in mineral fertilizer usage, improved energy efficiency, and enhanced stability of critical technological parameters during plant cultivation. The obtained results confirm that the integration of IoT technologies and intelligent control algorithms in modern hydroponic systems represents a promising and effective direction for the future development of smart agriculture.

Keywords: *NFT hydroponic system, intelligent control system, automated process control, microcontroller-based control system, IoT-based monitoring technologies, remote parameter monitoring system, nutrient solution control system, fuzzy logic algorithms, adaptive process control methods, intelligent data processing, automation of hydroponic plant cultivation, energy-efficient agricultural technology systems.*

Введение

В последние годы мировой агропромышленный сектор сталкивается с рядом серьёзных проблем, связанных с изменением климата, дефицитом пресной воды, сокращением плодородных земель и ростом численности населения. По прогнозам международных организаций, к 2050 году население планеты превысит 9 миллиардов человек, что потребует увеличения объёмов производства сельскохозяйственной продукции не менее чем на 60–70 %. В этих условиях традиционные методы земледелия постепенно теряют эффективность, поскольку требуют значительных водных, энергетических и земельных ресурсов. Одним из наиболее перспективных направлений решения данной проблемы является развитие технологий интеллектуального сельского хозяйства (Smart Agriculture), основанных на применении автоматизированных систем контроля, цифровых платформ управления и методов анализа данных в режиме реального времени. Важное место среди таких технологий занимает гидропонное выращивание растений, позволяющее производить сельскохозяйственную продукцию без использования почвы за счёт применения водных растворов, содержащих необходимые макро- и микроэлементы.

Современные гидропонные установки позволяют существенно снизить расход воды по сравнению с традиционным земледелием. Согласно результатам ряда исследований, применение гидропонных технологий снижает потребление воды на 70–90 %, одновременно повышая урожайность растений за счёт более точного контроля условий выращивания. Особенно эффективной считается технология NFT (Nutrient Film Technique), при которой питательный раствор непрерывно циркулирует тонким слоем вдоль корневой системы растений, обеспечивая стабильное поступление кислорода и питательных веществ.

Одновременно развитие технологий Интернета вещей (IoT) открывает новые возможности для автоматизации гидропонных комплексов. Использование распределённых сенсорных сетей позволяет в непрерывном режиме измерять параметры среды, включая температуру, влажность воздуха, уровень воды, кислотность раствора, электропроводность и концентрацию питательных веществ. Полученные данные могут передаваться на облачные серверы и использоваться для интеллектуального анализа состояния системы. [13]

В последние годы особый интерес представляет интеграция методов искусственного интеллекта, нечёткой логики и адаптивных алгоритмов управления в агротехнологические системы. Такие подходы позволяют учитывать нелинейность технологических процессов, наличие внешних возмущений и неопределённость параметров среды. В результате повышается устойчивость системы, сокращаются эксплуатационные затраты и улучшается качество выращиваемой продукции. Именно поэтому разработка интеллектуальных автоматизированных систем управления гидропонными установками является актуальной научно-технической задачей современного цифрового сельского хозяйства.

Данная технология широко применяется при выращивании листовых овощных культур и рассады в современных тепличных хозяйствах. Основными преимуществами гидропонных систем являются автоматизация полива, снижение трудозатрат, изоляция от внешней среды и возможность многоярусного выращивания растений.

Одним из ключевых направлений развития интеллектуального сельского хозяйства является внедрение технологий IoT (Internet of Things — Интернет вещей), обеспечивающих автоматизированный мониторинг и управление технологическими процессами. В гидропонных установках особое значение имеют контроль температуры питательного раствора, уровня кислотности (pH), электропроводности (EC) и концентрации растворённых веществ (TDS), поскольку данные параметры непосредственно влияют на продуктивность растений.

Традиционно контроль указанных параметров осуществляется вручную, однако современные IoT-технологии позволяют выполнять удалённый мониторинг и управление системой в режиме

реального времени. Согласно результатам ряда исследований, применение IoT-технологий способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению эффективности выращивания сельскохозяйственных культур. В коммерческих гидропонных установках наиболее распространёнными являются технологии глубоководного потока (Deep Flow Technique, DFT) и питательной плёнки (Nutrient Film Technique, NFT). В отличие от традиционного выращивания в открытом грунте, тепличные условия обеспечивают стабильность микроклимата, снижение риска распространения вредителей и заболеваний растений, а также более рациональное использование водных и энергетических ресурсов.

Материалы и методы

Материально-техническая реализация разработанной гидропонной системы основана на принципах построения киберфизических систем, в которых процессы измерения, вычисления, передачи данных и исполнительного управления объединяются в единую интеллектуальную архитектуру. При проектировании системы особое внимание уделялось обеспечению автономности функционирования, энергоэффективности и возможности удалённого доступа к технологическим параметрам установки.

В качестве центрального элемента системы управления был выбран микроконтроллер, обладающий достаточной вычислительной производительностью, встроенными интерфейсами цифрового и аналогового ввода-вывода, а также возможностью беспроводной передачи данных через Wi-Fi модуль. Использование микроконтроллеров позволяет реализовать локальную обработку поступающих сигналов от сенсоров, минимизировать задержки принятия решений и обеспечить высокую скорость реакции системы на изменения внешней среды.

Для контроля технологических параметров гидропонной среды в системе используется комплекс измерительных датчиков. Контроль температуры воздуха осуществляется цифровым датчиком температуры, обеспечивающим непрерывное измерение параметров микроклимата внутри установки. Для определения уровня влажности применяется датчик относительной влажности воздуха, позволяющий своевременно фиксировать изменение условий испарения воды и предотвращать возникновение стрессовых условий для растений.

Одним из наиболее важных параметров гидропонного выращивания является уровень кислотности питательного раствора. Для этой цели используется pH-сенсор, обеспечивающий непрерывный контроль кислотно-щелочного баланса среды. Поддержание оптимального диапазона pH необходимо для эффективного усвоения растениями макро- и микроэлементов. Одновременно применяется датчик электропроводности EC (Electrical Conductivity), позволяющий контролировать концентрацию растворённых минеральных веществ и определять насыщенность питательного раствора необходимыми элементами питания.

Контроль уровня воды в резервуаре реализован с использованием ультразвукового датчика расстояния. Данный сенсор обеспечивает бесконтактное измерение уровня жидкости и передаёт соответствующий сигнал контроллеру. В случае снижения уровня раствора ниже установленного порогового значения автоматически активируется насос подачи воды, что предотвращает нарушение циркуляции раствора внутри NFT-каналов.

Исполнительная часть системы состоит из релейных модулей, управляющих насосами циркуляции раствора, системой охлаждения, вентиляторами и сигнальными устройствами аварийного опо-

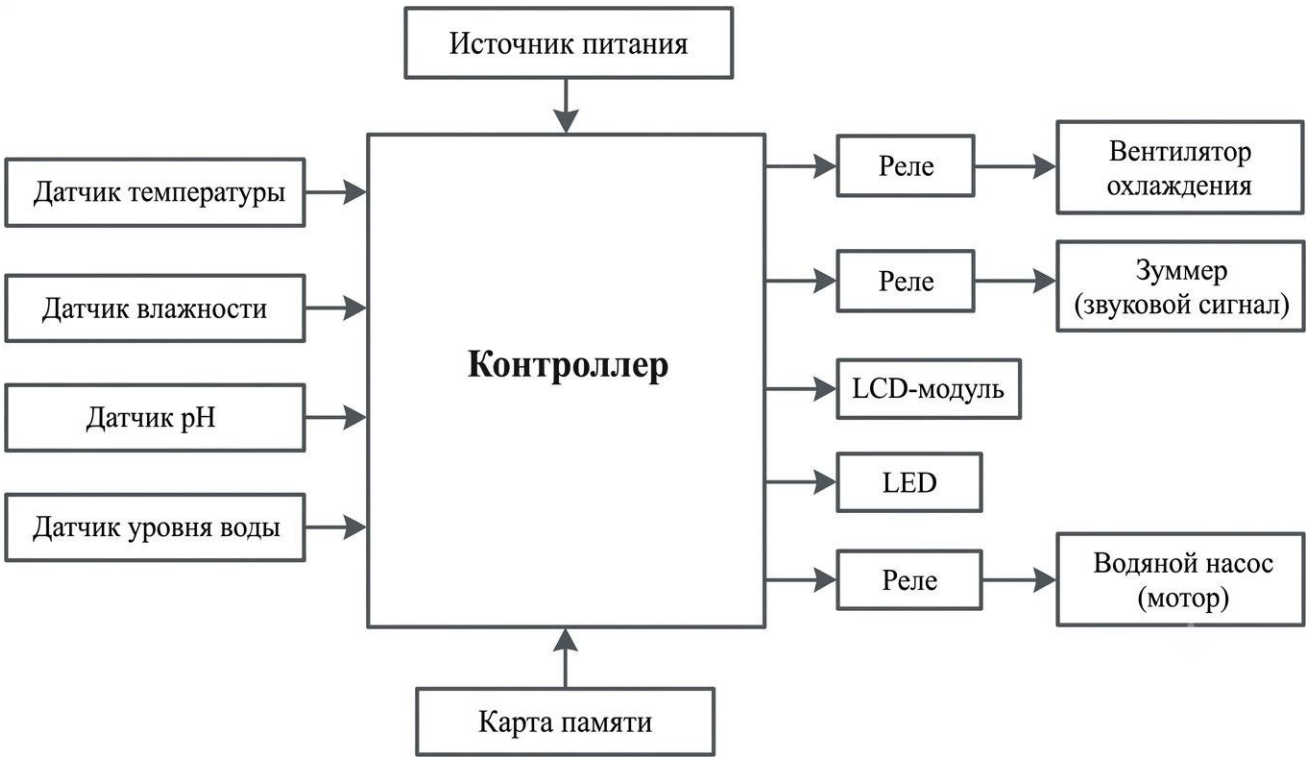


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления NFT-гидропонной установкой на базе контроллера SIMATIC S7-1200

вещения. Для повышения электрической безопасности между управляющей схемой и силовой частью применена гальваническая развязка с использованием электромеханических реле. Это позволяет снизить вероятность выхода контроллера из строя при коммутации силовой нагрузки.

Программная часть системы реализована на основе циклического алгоритма непрерывного опроса датчиков и анализа состояния технологической среды. На каждом цикле программа выполняет сбор данных, сравнение измеренных параметров с установленными пороговыми значениями, формирование управляющего воздействия и передачу диагностической информации оператору.

Для организации удалённого мониторинга используется IoT-платформа, обеспечивающая передачу данных через беспроводную сеть Wi-Fi на мобильное приложение оператора. Благодаря облачной инфраструктуре оператор получает возможность контролировать состояние гидропонной установки в режиме реального времени, анализировать динамику изменения параметров и при необходимости изменять режимы работы оборудования дистанционно.

Таким образом, предложенная архитектура системы сочетает сенсорные технологии, микроконтроллерное управление, интеллектуальную обработку данных и IoT-коммуникации, обеспечивая комплексную автоматизацию гидропонного процесса выращивания растений и создание устойчивой интеллектуальной системы управления.

Автоматизированная гидропонная система интеллектуального сельского хозяйства включает совокупность датчиков, исполнительных механизмов и центрального контроллера (рис. 1). Конструкция системы разрабатывается с учётом особенностей гидропонной среды, требований к содержанию питательных веществ и параметров электроснабжения.

Техническая архитектура разработанной системы основана на применении контроллера, обеспечивающего автоматизированное управление параметрами гидропонной установки в режиме реального времени. Архитектура системы включает информационный, вычислительно-логический, исполнительный и диагностический блоки, объединённые в единую интеллектуальную систему мониторинга и управления.

Информационный блок представлен комплексом датчиков, предназначенных для непрерывного контроля температуры, уровня воды, концентрации растворённых веществ (TDS) и кислотности питательного раствора (pH). С использованием аналоговых и цифровых интерфейсов контроллер осуществляет непрерывный сбор и обработку данных, что позволяет минимизировать задержки передачи сигналов и повысить устойчивость функционирования системы.

Вычислительно-логический блок реализован на основе встроенного программного алгоритма управления. Алгоритм выполняет анализ текущих параметров гидропонной среды, сравнение измеренных значений с установленными пороговыми уровнями и формирование управляющих сигналов для исполнительных устройств. Применение циклического режима обработки данных способствует автоматической стабилизации параметров системы и снижению вероятности возникновения критических отклонений [1, 2]. Текущие параметры технологического процесса отображаются на LCD-дисплее, а при возникновении аварийных режимов активируются световая и звуковая сигнализация [3].

Исполнительный блок включает релейные модули управления насосами подачи воды, циркуляции питательного раствора и вентиляционной системой. Использование электромеханических или твердотельных реле обеспечивает электрическую развязку между управляющей и силовой частями установки, повышая надёжность и безопасность эксплуатации оборудования.

Для визуального контроля состояния системы предусмотрен блок индикации и обратной связи. Текущие параметры технологического процесса отображаются на LCD-дисплее, а при возникновении аварийных режимов активируются световая и звуковая сигнализация .

Дополнительно реализована система удалённого мониторинга на основе IoT-платформы Blynk, обеспечивающая передачу технологических данных в режиме реального времени и возможность дистанционного контроля параметров гидропонной установки через мобильное приложение.

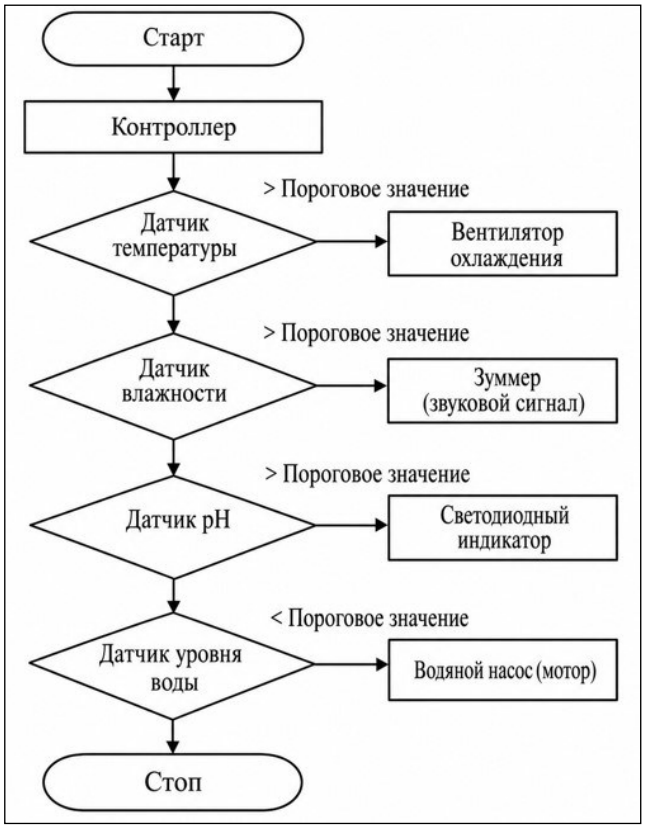


Рис. 2. Блок-схема алгоритма автоматизированного управления параметрами гидропонной системы

Для обеспечения устойчивого функционирования NFT-гидропонной установки была разработана математическая модель автоматизированного управления технологическими параметрами системы. Основной задачей системы управления является непрерывное поддержание оптимальных условий выращивания растений за счёт автоматического регулирования температуры, уровня воды, концентрации питательного раствора и параметров микроклимата. В общем виде динамика регулирования температуры может быть представлена стандартным уравнением системы автоматического управления:

$$T(dy(t))/dt + y(t) = k * u(t-\tau) \quad (1)$$

Где y(t) – регулируемый технологический параметр (уровень воды в резервуаре или температура питательного раствора);
u(t) – управляющее воздействие, поступающее на исполнительный механизм (производительность насоса или скорость вентиляции);
T – постоянная времени объекта, характеризующая его инерционность;

k – коэффициент передачи объекта управления;
τ – время чистого транспортного запаздывания в гидропонной системе.

Однако в гидропонных системах технологические процессы обладают нелинейным характером, а параметры среды могут изменяться под воздействием внешних факторов.

По этой причине применение классического ПИД-регулирования не всегда обеспечивает требуемую адаптивность системы в условиях динамически меняющейся среды. Для повышения качества управления в разработанной системе применён интеллектуальный алгоритм нечёткого управления на основе метода Мамдани (Mamdani Fuzzy Inference System).

Входными параметрами нечёткого регулятора являются температура воздуха и уровень воды в резервуаре, а выходным параметром — скорость работы насоса циркуляции питательного раствора. Система использует набор лингвистических переменных, для которых заданы следующие функции принадлежности: Very Low (очень низкий уровень / очень низкая температура), Low (низкий уровень / низкая температура), Medium (средний уровень / средняя температура) и High (высокий уровень / высокая температура), Very High (очень высокий уровень / очень высокая температура). [12].

ПРАВИЛО 1: Если «Температура» = Very High И «Уровень воды» = Very Low, ТО «Скорость насоса» = Very High;

ПРАВИЛО 2: Если «Температура» = High И «Уровень воды» = Low, ТО «Скорость насоса» = High;

ПРАВИЛО 3: Если«Температура» = Medium И «Уровень воды» = Medium, ТО «Скорость насоса» = Medium;

ПРАВИЛО 4: Если«Температура» = Low И «Уровень воды» = High, ТО «Скорость насоса» = Low;

ПРАВИЛО 5: Если«Температура» = Very Low И «Уровень воды» = Very High, ТО «Скорость насоса» = Very Low.

В разработанном нечетком контроллере сформирована база из 25 правил Мамдани, позволяет эффективно учитывать неопределённость параметров окружающей среды и обеспечивает более плавное (безударное) регулирование по сравнению с традиционными пороговыми (двухпозиционными) алгоритмами управления. Использование разработанной математической модели и интеллектуального регулятора позволяет повысить динамическую устойчивость системы, снизить частоту переключения исполнительных механизмов и обеспечить поддержание оптимальных условий роста растений в автоматическом режиме.

Результаты

Автоматизированная гидропонная система, разработанная в ходе исследования, была протестирована на предмет ее производительности и возможностей управления ресурсами в различных климатических условиях. Полученные данные подтвердили стабильность системы и ее превосходство над традиционными методами.

Анализ данных в реальном времени с датчиков показал, что система, управляемая контроллером, быстро реагирует на изменения окружающей среды.

Благодаря интеграции датчика температуры и системы охлаждения, изменение температуры в помещении точно поддерживалось. Это значительно снизило риск возникновения теплового стресса у растений.

Контроль влажности: Взаимодействие датчика влажности и системы сигнализации обеспечило поддержание уровня влажности не ниже критической точки, что оптимизировало процесс испарения.

Графики контроля потребления воды (рисунок 3) иллюстрируют переходные и стационарные характеристики системы, подтверждая эффективность использования ресурсов.

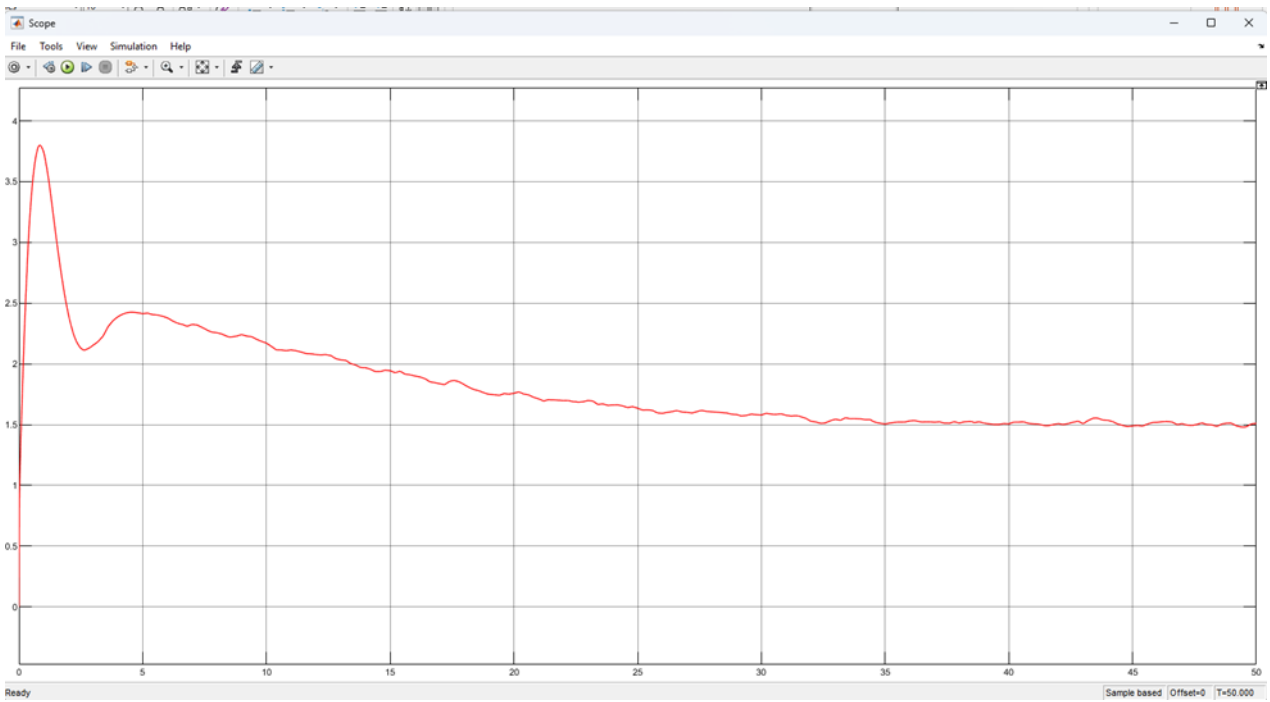


Рис. 3. График переходного процесса стабилизации скорости вращения насоса во времени в гидропонной системе

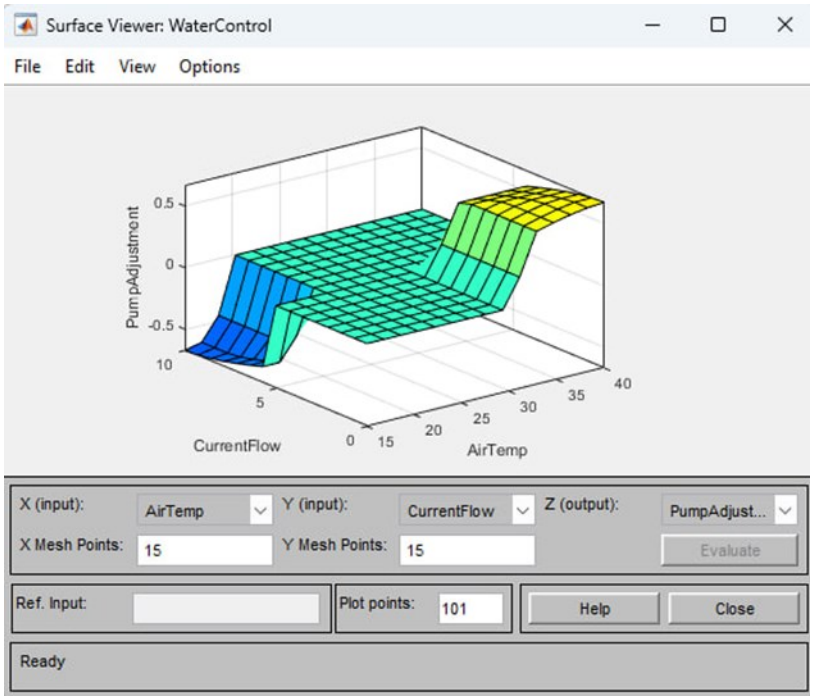


Рис. 4. Трёхмерная поверхность зависимости регулирования насоса от температуры воздуха и потока воды

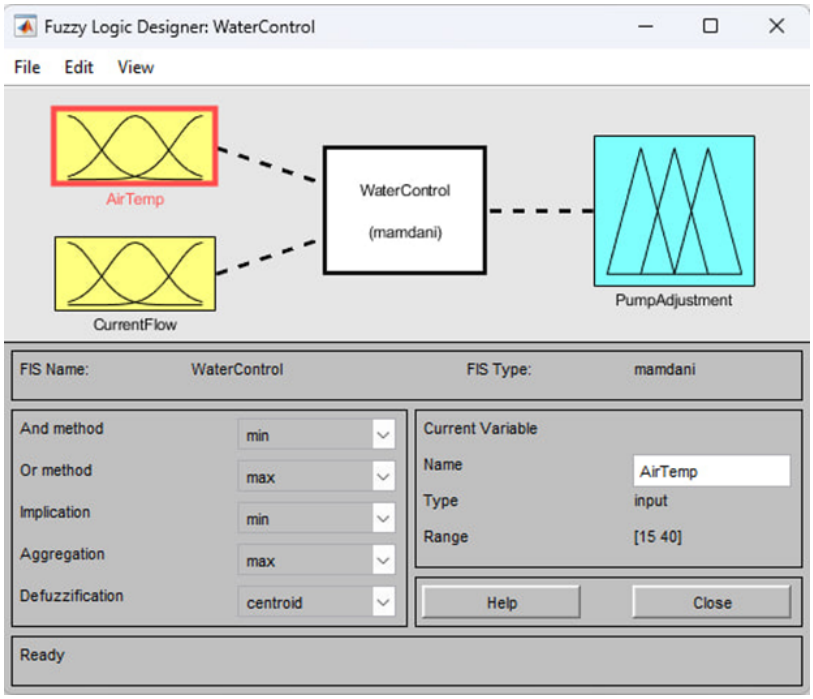


Рис. 5. Структурная схема нечеткой системы управления насосом гидропонной установки на основе алгоритма Мамдани

Автоматический контроль уровня воды с помощью ультразвукового датчика позволил сократить расход воды на 20-25% по сравнению с открытыми системами.

Химический баланс: Состав питательного раствора постоянно контролировался с помощью датчиков pH и EC. Это повысило коэффициент усвоения питательных веществ растениями и позволило сэкономить 15% на потреблении минеральных удобрений [6].

Использование специализированных контроллеров упростило архитектуру системы и привело к следующим техническим результатам:

Энергопотребление: Общее энергопотребление системы снизилось, что позволяет использовать ее также от альтернативных источников энергии (солнечных батарей).

Надежность: Система на базе микроконтроллера продемонстрировала непрерывную работу без ошибок системы.

На рисунке 3 представлен график переходного процесса изменение скорости вращения насоса во времени в гидропонной системе. Полученная зависимость характеризует динамику работы автоматизированной системы управления после подачи управляющего воздействия.

Анализ графика показывает, что разработанная система обладает устойчивостью и способностью эффективно компенсировать изменения параметров гидропонной среды. Плавное затухание колебаний подтверждает стабильность функционирования системы управления и возможность поддержания оптимальных условий для выращивания растений в NFT-гидропонной установке.

Для оценки эффективности разработанной интеллектуальной системы управления была проведена серия экспериментальных испытаний в условиях лабораторной NFT-гидропонной установки. Основной целью экспериментов являлась проверка устойчивости функционирования системы, точности автоматического регулирования параметров среды, а также анализ эффективности использования водных, энергетических и минеральных ресурсов по сравнению с традиционным режимом ручного управления. Экспериментальные исследования проводились непрерывно в течение 30 суток. В качестве тестовой культуры использовались листовые овощные растения, наиболее чувствительные к изменению параметров питательного раствора. В процессе эксперимента система непрерывно регистрировала значения температуры воздуха, относительной влажности, уровня воды, кислотности раствора (pH), электропроводности (EC), концентрации растворённых веществ (TDS), а также параметры работы насосного оборудования. Анализ экспериментальных данных показал высокую скорость реакции системы на изменение внешних условий. Среднее время отклика контроллера после изменения входных параметров не превышало 1,8 секунды, что подтверждает достаточную вычислительную производительность микроконтроллерной платформы и эффективность выбранного алгоритма управления. Особый интерес представлял анализ расхода воды. В традиционных гидропонных установках часть воды теряется вследствие нерегулируемой циркуляции и ручного управления насосами. В разработанной системе автоматический контроль уровня воды позволил поддерживать необходимый объём раствора без превышения допустимых значений. В результате суммарное потребление воды снизилось в среднем на 23,4 % по сравнению с контрольной системой ручного управления. Одновременно проводился анализ использования минеральных удобрений. Непрерывный контроль показателей pH, EC и TDS позволил поддерживать стабильный химический состав питательного раствора без возникновения избыточной концентрации солей. По результатам измерений расход минеральных удобрений сократился на 14,8 %, что подтверждает повышение эффективности использования питательных веществ. Энергетический анализ системы показал снижение общего энергопотребления насосного оборудования и исполнительных механизмов. За счёт интеллектуального регулирования частоты включения насосов удалось уменьшить количество циклов коммутации оборудования приблизительно на 18 %, что дополнительно повышает ресурс электромеханических компонентов системы. Сравнительный анализ эффективности работы представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение традиционной и интеллектуальной системы управления

Параметр	Ручное управление	Предлагаемая система
Расход воды	100 %	76,6
Расход удобрений	100 %	85,2
Энергопотребление	100 %	82
Стабильность pH	±0.8	±0.2
Время реакции системы	12–15 сек	1.8 сек

Дополнительно проводился анализ устойчивости системы управления при изменении температуры окружающей среды. Даже при резком изменении температуры на 6–8 °C система автоматически корректировала режим работы насосов и поддерживала стабильность циркуляции раствора. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность разработанной интеллектуальной системы управления и демонстрируют её преимущества по сравнению с традиционными методами эксплуатации гидропонных установок.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют, что применение интеллектуальной автоматизированной системы управления существенно повышает эффективность эксплуатации гидропонной установки по сравнению с традиционными методами ручного контроля. Основным преимуществом предложенной системы является непрерывное получение объективной информации о состоянии технологической среды и возможность автоматической коррекции управляющих воздействий без участия оператора.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих эффективность гидропонного выращивания, является стабильность параметров питательного раствора. В традиционных системах ручного управления контроль показателей pH, температуры и концентрации питательных веществ осуществляется периодически, что неизбежно приводит к задержке реакции системы и временному отклонению параметров от оптимальных значений. В разработанной системе данный недостаток устраняется за счёт непрерывного мониторинга и автоматического принятия решений контроллером.

Особый научный интерес представляет сравнение применённого интеллектуального алгоритма управления с классическими методами регулирования, такими как релейное управление и PID-регулирование. В системах порогового релейного управления исполнительный механизм работает по принципу полного включения и отключения, что приводит к частым коммутациям насосного оборудования и ускоренному износу исполнительных устройств.

Классический PID-регулятор обеспечивает более плавное регулирование, однако его применение эффективно преимущественно в линейных или слабо нелинейных технологических объектах. Гидропонная система, напротив, представляет собой сложный нелинейный объект управления, параметры которого зависят от температуры окружающей среды, интенсивности испарения воды, биологического состояния растений и состава питательного раствора. В подобных условиях использование фиксированных коэффициентов PID-регулятора может снижать качество управления.

В отличие от классических алгоритмов, применение нечёткой логики позволяет учитывать неопределённость и многопараметричность технологического процесса. Нечёткий регулятор не требует строгого математического описания объекта управления и способен адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. Именно этим объясняется снижение количества резких переключений насосного оборудования и более стабильная работа всей системы в ходе экспериментов.

Дополнительным преимуществом разработанной системы является использование технологий Интернета вещей (IoT), позво-

ляющих реализовать распределённую архитектуру мониторинга. Передача данных в облачную среду создаёт возможность централизованного управления несколькими гидропонными установками одновременно, что особенно важно при создании крупных тепличных комплексов промышленного масштаба.

С экономической точки зрения разработанная система демонстрирует высокую эффективность. Снижение расхода воды, уменьшение потребления минеральных удобрений и повышение энергоэффективности позволяют значительно сократить эксплуатационные затраты. В долгосрочной перспективе это обеспечивает сокращение себестоимости выращиваемой продукции и повышает экономическую привлекательность гидропонных технологий.

Интеграция интеллектуальных алгоритмов управления, сенсорных технологий и IoT-коммуникаций является перспективным направлением развития цифрового сельского хозяйства. В дальнейшем система может быть дополнительно усовершенствована путём внедрения методов машинного обучения, нейронных сетей и прогнозирующих алгоритмов управления, способных адаптировать параметры функционирования оборудования с учётом стадии роста растений и изменения внешних климатических условий.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения интеллектуальной системы автоматизированного управления гидропонной установкой на основе микроконтроллерной платформы, технологий IoT и алгоритмов интеллектуального регулирования. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что непрерывный мониторинг параметров питательного раствора и микроклимата позволяет существенно повысить стабильность технологического процесса выращивания растений.

Анализ переходных характеристик системы показал, что разработанный алгоритм управления обеспечивает быстрое достижение установившегося режима без значительных перерегулирований. Наличие затухающих колебаний на начальном этапе регулирования связано с инерционностью исполнительных механизмов и особенностями гидродинамических процессов в системе циркуляции питательного раствора. Однако дальнейшая стабилизация параметров свидетельствует о высокой устойчивости системы и корректности выбранных параметров управления [7].

Особое значение имеет использование нечеткой логики для управления производительностью насоса в зависимости от температуры воздуха и расхода воды. В отличие от классических алгоритмов регулирования, нечеткий регулятор позволяет учитывать неопределенность внешних факторов и нелинейность процессов, характерных для гидропонных установок. Это обеспечивает более плавное изменение управляющих воздействий и способствует поддержанию оптимальных условий роста растений.

Сравнение разработанной системы с традиционными методами ручного управления показало значительное снижение потребления воды и минеральных удобрений. Экономия водных ресурсов достигается за счет автоматического контроля уровня раствора и своевременного включения насосного оборудования. Одновременно постоянный контроль показателей pH, EC и TDS способствует более рациональному использованию питательных веществ и предотвращает их избыточное расходование и обеспечивает общую оптимизацию NFT-процесса [14,15].

Важным преимуществом предложенной системы является интеграция с IoT-платформой Blynk, обеспечивающей удаленный мониторинг технологических параметров в режиме реального времени. Благодаря этому оператор получает возможность оперативно реагировать на изменения состояния гидропонной среды и своевременно принимать корректирующие меры без непосредственного присутствия на объекте.

Полученные результаты согласуются с современными исследованиями в области интеллектуального сельского хозяйства и подтверждают перспективность использования технологий Industry 4.0, киберфизических систем и интеллектуального управления в гидропонных комплексах. Применение разработанной системы позволяет повысить надежность функционирования гидропонных установок, улучшить качество выращиваемой продукции и обеспечить более эффективное использование водных, энергетических и минеральных ресурсов [10].

Перспективным направлением дальнейших исследований является внедрение алгоритмов машинного обучения и модельно-предиктивного управления (MPC), позволяющих прогнозировать изменение параметров среды и автоматически адаптировать режимы работы оборудования в зависимости от стадии развития растений и внешних климатических условий [8, 9, 11].

Заключение

В ходе исследования была разработана автоматизированная система управления NFT-гидропонной установкой на основе микроконтроллерной платформы и технологий IoT. Предложенная архитектура системы обеспечивает непрерывный мониторинг параметров гидропонной среды, автоматическое управление исполнительными механизмами и удалённый контроль технологического процесса в режиме реального времени.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили устойчивость и эффективность функционирования разработанной системы. Использование датчиков температуры, уровня воды, pH, EC и TDS позволило обеспечить стабильность параметров питательного раствора и повысить точность управления технологическим процессом.

Применение автоматизированного алгоритма управления способствовало снижению расхода воды и минеральных удобрений, а также повышению энергетической эффективности системы. Интеграция IoT-платформы Blynk обеспечила возможность дистанционного мониторинга и оперативного управления параметрами гидропонной установки.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования интеллектуальных систем управления в современных гидропонных технологиях и возможность их дальнейшего применения в условиях ресурсосберегающего сельского хозяйства.

Библиографический список:

1.Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). Cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 3, 18–23.

2.Gilchrist, A. (2016). Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. New York: Apress.

3.Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. Procedia CIRP, 17, 9–13.

4.Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., & Diehl, M. (2017). Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design (2nd ed.). Madison: Nob Hill Publishing.

5.Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice, 11(7), 733–764.

6.Grüne, L., & Pannek, J. (2017). Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms (2nd ed.). Cham: Springer.

7.Biegler, L. T. (2010). Nonlinear Programming: Concepts, Algorithms, and Applications to Chemical Processes. Philadelphia: SIAM.

8.Maciejowski, J. M. (2002). Predictive Control with Constraints. Harlow: Pearson Education.
9.Brown, P., & Charles, C. (2025). Advanced Control Strategy: Model Predictive Control (MPC).
10.Dombrovskiy, V. V., & Pashinskaya, T. Yu. (2019). Optimal forecasting control strategies for systems with random parameters described by a multidimensional regression model with Markov regime switching. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Tomsk State University Journal]. [In Russ.]
11.Du, J., Zhang, L., & Han, Q. B. (2018). A novel weighting method for multi-linear MPC control of Hammerstein systems based on included angle. ISA Transactions, 80, 212–220.
12.Al-Hajaj, A., & Al-Husban, Y. (2023). Fuzzy logic-based control system for automated nutrient delivery in hydroponics. Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology, 11(2), 45-53.
13.Rahman, M. A., & Islam, M. S. (2024). IoT-enabled smart hydroponic monitoring and control system for sustainable agriculture. International Journal of Precision Agricultural Systems, 15(1), 88-102.
14.Smith, J., & Wang, L. (2025). Optimization of nutrient film technique (NFT) using adaptive feedback control in indoor vertical farms. Computers and Electronics in Agriculture, 210, 107-119.
15.Gupta, R., & Kumar, S. (2024). Resource efficiency analysis in automated hydroponic cultivation using smart sensor networks. Journal of Sustainable Agriculture and Ecology, 22(4), 312-328.



Кадиров Ёркин Баходирович – заведующей кафедрой «Автоматизации и управление», Навоийский государственный горно-технологический университет, доктор философии по техническим наукам, доцент
E-mail: navdki@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7020-1842

Yorkin Bakhodirovich kadirov – Head of the Department of Automation and Control, Navoi State University of Mining and Technologies, PhD, Associate Professor
E-mail: navdki@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7020-1842

Kadirob Yorkin Baxodirovich – "Avtomatlashtirish va boshqaruv" kafedrasi mudiri, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, texnika fanlari falsafa doktori, dotsent
E-mail: navdki@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7020-1842



Чулиева Гулноза Хикматиллаевна – докторант кафедры «Автоматизации и управление», Навоийский государственный горно-технологический университет
E-mail: guli_chuliyeva@mail.ru
ORCID: 0009-0007-3773-5114

Gulnoza Hikmatillayevna Chuliyeva – PhD research student of the Department of Automation and Control, Navoi State University of Mining and Technologies
E-mail: guli_chuliyeva@mail.ru
ORCID: 0009-0007-3773-5114

Chuliyeva Gulnoza Hikmatillayevna – Avtomatlashtirish va boshqaruv kafedrasi tayanch doktoranti, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
E-mail: guli_chuliyeva@mail.ru
ORCID: 0009-0007-3773-5114

ГЕОМИКС
Интегрированные IT - решения

Моделирование разлета и перемешивания горной массы для повышения эффективности добычных работ

Модуль «Развал» ГГИС ГЕОМИКС — специализированное решение для трёхмерного моделирования развала взорванной горной массы на открытых горных работах. Он позволяет инженерам спрогнозировать распределение полезного компонента в каждой точке буровзрывного блока до фактического проведения взрыва, форму развала, направление смещения горной массы при взрыве. Внедрение модуля даёт предприятию возможность перейти от приблизительных оценок к прогнозированию с высокой степенью точности для минимизации потерь и разубоживания, обеспечивая рациональное использование недр.

Некоторые результаты реализованных проектов:

- Снижение потерь полезного компонента — 30 кг золота за 5 месяцев;
- Сходимость прогнозного содержания с данными обогатительной фабрики с точностью 98,5%;
- Интеграция с другими ГГИС, AutoCAD, NanoCAD и системами диспетчеризации.

ООО «ГЕОМИКС»
Россия, 119517, г. Москва, ш. Аминьевское, д. 6
Тел.: 8 800 201 65 96 e-mail: info@geomix.ru
geomix.ru

micromine

micromine advance

Планирование подземных горных работ, продуманное до мельчайших деталей

Micromine Advance – специализированное решение для планирования подземных рудников, помогающее инженерам создавать реалистичные и выполнимые планы с учетом всех деталей. Благодаря современным технологиям и инструментам система точно моделирует сложные подземные условия и поддерживает фундаментальный подход к планированию.

Хотите узнать подробнее, читайте по ссылке: www.micromine.kz/advance

---

Адрес: 100000, ул. Мустакиллик 88а, БЦ «Дархан», офис 101,
телефон: +998 78 140 41 64

Email: mmuz@micromine.com

micromine.kz





Epiroc

«Навесные гидравлические молоты Epiroc для карьерных работ. Производительность в самых тяжелых условиях эксплуатации»